



UN CADRE EPISTEMO-SEMIOTIQUE POUR CONCEVOIR DES SEANCES ET ANALYSER DES PRATIQUES D'ETUDE ET D'ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE

Karine Bécu-Robinault

► To cite this version:

Karine Bécu-Robinault. UN CADRE EPISTEMO-SEMIOTIQUE POUR CONCEVOIR DES SEANCES ET ANALYSER DES PRATIQUES D'ETUDE ET D'ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE: HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE. Education. Université Toulouse Jean-Jaurès, 2015. tel-01237838

HAL Id: tel-01237838

<https://shs.hal.science/tel-01237838>

Submitted on 3 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE



Délivrée par :

Université Toulouse Jean Jaurès

Discipline ou Spécialité :

Sciences de l'Education

Présentée et soutenue par :

Karine Bécu-Robinault

Le 10 Avril 2015

TOME 1 : NOTE DE SYNTHÈSE

UN CADRE EPISTEMO-SEMIOTIQUE POUR CONCEVOIR DES SEANCES ET ANALYSER DES PRATIQUES D'ETUDE ET D'ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE ANCRAGES THEORIQUES ET RESULTATS

Ecole Doctorale

Comportement, Langage, Education, Socialisation, Cognition (CLESCO)

Unité de recherche

UMR Education Formation Travail Savoir (EFTS)

Directeur de l'HDR

Patrice Venturini, Professeur des Universités

Membres du Jury

Jean-Marie Boilevin, Professeur des Universités, Université de Bretagne Occidentale, Brest

Bernard Calmettes, Maître de Conférences HDR, Université Toulouse Jean Jaurès

Erica de Vries, Professeur des Universités, Université Pierre-Mendès-France, Grenoble

Cécile de Hosson, Professeur des Universités, Université Paris Diderot – Rapporteur

Ludovic Morge, Professeur des Universités, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand – Rapporteur

Olivier Perru, Professeur des Universités, Université Claude Bernard, Lyon

Patrice Venturini, Professeur des Universités, Université Toulouse Jean Jaurès : Directeur – Rapporteur

Le vrai peut quelquefois n'être pas vraisemblable.

Le réaliste, s'il est un artiste, cherchera, non pas à nous montrer la photographie banale de la vie, mais à nous en donner la vision plus complète, plus saisissante, plus probante que la réalité même. [...]

La vie, en outre, est composée des choses les plus différentes, les plus imprévues, les plus contraires, les plus disparates ; elle est brutale, sans suite, sans chaîne, pleine de catastrophes inexplicables, illogiques et contradictoires qui doivent être classées au chapitre faits divers. . [...]

La vie encore laisse tout au même plan, précipite les faits ou les traîne indéfiniment.

L'art, au contraire, consiste à user de précautions et de préparations, à ménager des transitions savantes et dissimulées, à mettre en pleine lumière, par la seule adresse de la composition, les événements essentiels et à donner à tous les autres le degré de relief qui leur convient, suivant leur importance, pour produire la sensation profonde de la vérité spéciale qu'on veut montrer.

Faire vrai consiste donc à donner l'illusion complète du vrai, suivant la logique ordinaire des faits, et non à les transcrire servilement dans le pêle-mêle de leur succession.

Guy de Maupassant, « Le roman », préface à Pierre et Jean, 1888

The world is closing in

Did you ever think

That we could be so close, like brothers

The future's in the air

I can feel it everywhere

Blowing with the wind of change

Klaus Meine, Wind of change, 1990

Remerciements

La rédaction de cette note de synthèse aura été une aventure humaine et professionnelle m'offrant l'opportunité de poursuivre et développer des échanges scientifiques toujours plus enrichissants.

Je tiens, avant tout, à remercier très chaleureusement Patrice Venturini pour sa confiance, ses encouragements, sa rigueur et ses critiques constructives qui ont largement participé à l'aboutissement de ce travail.

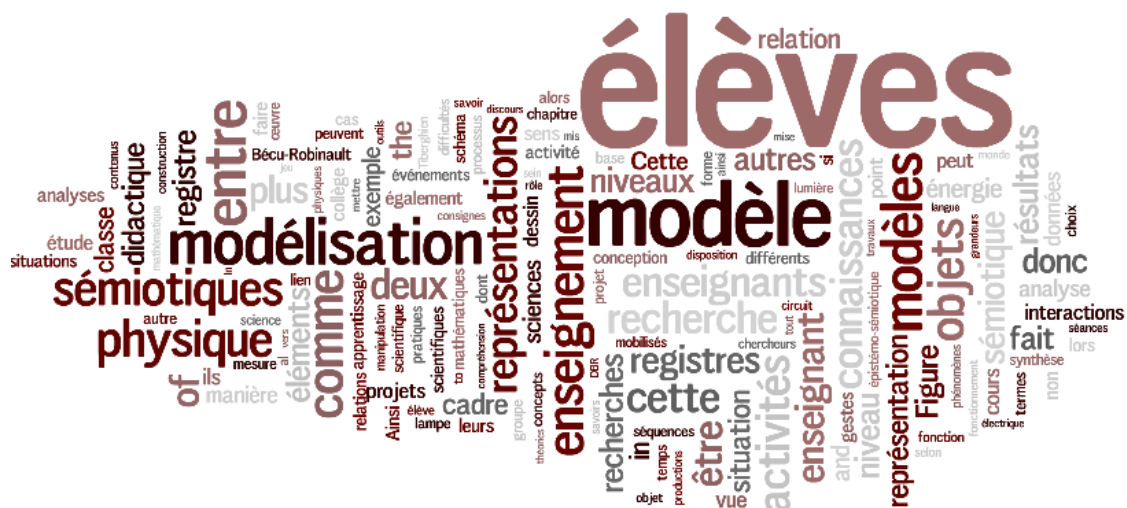
Mes remerciements vont aussi à Cécile de Hosson et Ludovic Morge qui m'ont fait l'honneur et l'immense plaisir d'accepter d'être rapporteurs. Je remercie également Erica de Vries, Jean-Marie Boilevin, Bernard Calmettes et Olivier Perru pour leur participation au jury de soutenance. Leurs commentaires, toujours pertinents, contribueront à alimenter mes réflexions.

Ma gratitude s'adresse aux nombreux enseignants, dont les noms apparaissent au fil de cette note de synthèse : ils ont partagé avec moi les joies et les contraintes des projets de recherches collaboratives en discutant continuellement de l'intérêt de la recherche en didactique pour leurs pratiques. Aucune de mes recherches n'existerait sans eux, et leurs élèves, bien entendu !

Je remercie aussi mes étudiants, et tout particulièrement Géraldine Delpieu-Boivin, Pierre Schramm et Marie Luc Ramamandraisoa, dont les réflexions pertinentes, au cours de leur thèse, ont régulièrement stimulé mon travail.

Parmi d'autres, il est aussi des collègues-amies qui ont soutenu continuellement ma motivation par leur estime, leur enthousiasme, leurs connaissances, et leur sens de l'humour dans les moments difficiles : Kristine Lund, Sabine Coste et Catherine Bruguière. Et surtout, un immense merci à Bernadette Pateyron pour sa relecture minutieuse et compréhensive.

Ce travail n'aurait pu aboutir sans Lionel, son amour, son écoute, son soutien sans faille, sans compter ses nouveaux talents de cuisinier. Mélanie a contribué à l'analyse des données que j'avais collectées quand elle était bébé, et Elise a su se contenter d'une maman souvent trop occupée. Je vous aime.



- Chapitre 1 -

Introduction

Dans ce premier chapitre, je présente l'objet de cette note de synthèse, j'indique l'approche didactique choisie, je précise l'inscription de mon cadre épistémologique dans la recherche en didactique de la physique et je définis mes objets d'analyse. J'expose ensuite le plan et l'articulation des huit chapitres qui composent cette note de synthèse, du contexte de mes recherches à la présentation de mes résultats et aux perspectives de recherches.

1 Remarques préliminaires

1.1 Objet de cette note de synthèse

Tout parcours de recherche est fait de rencontres scientifiques orientant les objets considérés, les approches mobilisées et les partenariats privilégiés. Depuis près de vingt années, j'ai participé aux activités scientifiques de quatre laboratoires. La reconstruction de mes contributions au champ de la didactique de la physique montre que l'orientation de mes recherches est restée constante et que la richesse de mes rencontres scientifiques ne s'est pas accompagnée d'une dispersion de mes centres d'intérêts mais d'une meilleure articulation de ceux-ci. Cette note de synthèse fut effectivement l'occasion de mettre en évidence comment mes choix méthodologiques, conceptuels se sont peu à peu articulés dans mes travaux, en prenant appui sur des collaborations toutes aussi variées qu'enrichissantes. Mes divers partenariats de recherche ont renforcé ces articulations et montré l'intérêt de ce que je présente aujourd'hui comme un cadre de conception de séances et d'analyse des pratiques d'études et d'enseignements de la physique. Les résultats de ces recherches et les perspectives que j'entrevois aujourd'hui sont aussi marqués par mes collaborations avec les enseignants.

Aux origines de mes recherches se trouve un intérêt marqué pour l'enseignement et l'apprentissage de la physique, discipline que je n'ai pu me résoudre à enseigner après ma formation universitaire, tant j'étais devenue consciente, à la fin de mon stage lors de la préparation du CAPES, de la difficulté des élèves à en comprendre les finalités et des perspectives offertes par la recherche en didactique de la physique. L'articulation entre les expériences réalisées en classe et les concepts ou les lois, qui permettaient d'expliquer et prédire les résultats obtenus m'a toujours semblé être au cœur des difficultés que j'avais rencontrées, en tant qu'élève tout d'abord, puis en tant que stagiaire IUFM en collège. Mon inscription en DEA de didactique des disciplines scientifiques à Lyon est le résultat de cette passion naissante et de ces interrogations. Cette formation à la recherche, finalisée par mon mémoire de DEA intitulé « l'équivalence chaleur travail au 19^{ième} siècle et en classe de première S », dirigé par Andrée Tiberghien, a marqué un tournant décisif dans mes aspirations professionnelles.

Mes premières interrogations étaient liées à la remise en cause de la construction des connaissances en physique comme découlant naturellement de l'observation des données (observées ou mesurées) de l'expérience. Ce mode d'élaboration des savoirs a été largement étudié et critiqué par les épistémologues et historiens des sciences, rejetant les postulats du positivisme logique. Ces réflexions

ont été reprises dès les années 70 par la didactique des sciences, en association avec l'approche piagétienne de la genèse des connaissances. Pour de nombreux auteurs, tant historiens que didacticiens, l'expérience ne peut être pensée indépendamment d'une théorie : l'expérience est fonction des corps de connaissances constituées, et les observations sont guidées par les présupposés théoriques. Les corrélations parfois troublantes entre l'histoire de l'élaboration des concepts scientifiques et les difficultés rencontrées par les élèves (Posner & al., 1982) ont orienté mon mémoire de DEA en didactique des sciences sur le parallèle entre enseignement et histoire de l'équivalence chaleur-travail en prenant comme porte d'entrée l'articulation entre les expériences conduites et la construction des concepts. J'ai mis en parallèle des hypothèses épistémologiques et des analyses des stratégies d'enseignement associées aux productions des élèves. Il manquait à cette approche une dimension importante liée aux connaissances mises en œuvre par les élèves dans le passage de l'expérimentation à la conceptualisation et aux processus d'articulation entre expérience et théorie. J'ai donc naturellement porté mes recherches en doctorat sur le rôle de l'expérience dans l'acquisition de connaissances sur les phénomènes énergétiques en développant une méthode d'analyse des activités des élèves au fil de la résolution des tâches proposées.

A la suite de ces premiers travaux de recherche, centrés sur les activités des élèves et fournissant un cadre de conception de séquences d'enseignement et d'analyse des processus d'étude, une interrogation subsistait : si les activités conçues sur la base de ce cadre aident effectivement les élèves à s'engager dans un processus d'étude conforme aux hypothèses d'apprentissage implémentées dans ces activités, en définitive, les élèves ne seraient-ils pas toujours contraints par la forme et les contenus des activités développées ? Cette question pose celle de la liberté de l'enseignant au cours de son activité et de la possibilité d'analyser simultanément, sur la base d'un même cadre, les activités des élèves en relation avec celles des enseignants. L'élaboration et la mise à l'épreuve d'un tel cadre a donc été au centre de mes recherches depuis mon doctorat.

Ce cadre, que j'appellerai cadre épistémo-sémiotique (CES), permet d'étudier les pratiques des deux types d'acteurs en interaction (élèves et enseignant). Son utilisation pour la conception et l'analyse de séances d'enseignement et les résultats qu'il a mis en évidence sont le focus de cette note de synthèse. A travers l'historique de la construction de ce cadre, la définition de ses composantes, et l'explication de son intérêt par rapport à d'autres approches mobilisées en didactique des sciences, je dresse une synthèse de ses apports sur les pratiques d'études et d'enseignement. En parallèle, je décris la méthodologie de recherche associée, dans laquelle enseignants et chercheurs jouent un rôle complémentaire.

1.2 Didactique de la physique et interactions en classe

De nombreuses approches en didactique des sciences rendent compte des phénomènes d'enseignement et d'apprentissage des contenus scientifiques (concepts et méthodes) en jeu. Ces approches sont liées à la fois à l'histoire de l'émergence de cette discipline (liens forts avec les disciplines de référence, articulation avec les autres sciences de l'éducation) et aux compositions des laboratoires de recherche dans lesquelles les didactiques se sont intégrées.

Depuis 1994, j'ai construit mon parcours de recherche en collaborant avec des chercheurs de divers horizons, principalement en lien avec trois laboratoires :

- Au sein du laboratoire de l'équipe COAST (Laboratoire IRPEACS, CNRS, Lyon), j'ai contribué à des projets avec des chercheurs en sciences cognitives, d'abord au cours de mon doctorat puis au cours de mes deux stages post-doctoraux (1993-1997) ;

- Lors de mes collaborations avec le Laboratoire des sciences de l'éducation (EA 602, Université Pierre Mendès-France, Grenoble), mes perspectives de recherches en didactique se sont enrichies au contact de chercheurs en psychologie sociale et en didactique professionnelle (2000-2003) ;
- Recrutée comme maître de conférences à l'UMR ICAR (UMR 5191, CNRS – Université Lyon 2, Lyon), les coopérations avec les linguistes et la coordination pédagogique du master « didactique et interactions » ont été autant d'occasion de confronter les théories et méthodes mobilisées en didactiques des sciences et des langues. L'apport des sciences du langage a contribué à développer des aspects liés aux média et modes de communication (2003-2012) ;
- Enfin, ma demande de mutation vers l'EA S2HEP (EA 4148, Université Lyon 1 – Ecole normale supérieure de Lyon, Lyon) en janvier 2012 s'appuyait sur la volonté de collaborer plus étroitement avec des épistémologues et philosophes des sciences, et des didacticiens des sciences. Cette diversité des positionnements théoriques et des didactiques scientifiques sont sources de réflexion sur les croisements possibles entre les approches didactiques, épistémologiques et historiques des sciences.

Mon parcours a influencé les approches choisies pour mes analyses didactiques. En premier lieu, cette diversité m'a incitée à me concentrer sur la spécificité du fonctionnement de la physique et donc à prendre appui sur un point de vue épistémologique de cette discipline. Ensuite, les présupposés psychologiques sur l'apprentissage et les outils développés par les sciences du langage m'ont amenée à focaliser mes recherches sur les interactions entre les acteurs en contexte ordinaire (enseignants et élèves dans la salle de classe) et le rôle des supports mobilisés lors de ces interactions (consignes, objets matériels, simulations informatiques, outils de communication). Dans toutes mes recherches, les interactions didactiques sont considérées selon deux points de vue : elles contribuent à favoriser l'apprentissage tant dans leur dimensions matérielles que sociales, et elles sont les données de mes analyses, permettant de caractériser les connaissances mises en œuvre par les élèves et par les enseignants. Je développerai dans cette note comment mon analyse des situations de classe et mes hypothèses épistémologiques et sémiotiques ont émergé et se sont peu à peu combinées pour constituer un cadre cohérent d'analyse des pratiques d'enseignement et d'apprentissage.

1.3 Développement d'un cadre autour de la modélisation

D'un point de vue épistémologique, il est possible de caractériser le fonctionnement de la physique comme la recherche de relations entre les phénomènes et les concepts et les lois permettant d'expliquer, d'interpréter, de prédire ces phénomènes. Ces relations de modélisation, fondatrices de l'élaboration des savoirs en physique, sont aussi au cœur de l'enseignement de cette discipline. Elles sont étudiées selon différentes approches, que je précise brièvement ci-dessous.

Dès le milieu des années 80, la communauté de recherche en didactique des sciences s'est intéressée aux activités de modélisation comme essentielle pour enseigner et apprendre les sciences. Deux courants de recherche ont émergé (Tiberghien & al., 2002). Le premier (Martinand, 1992 ; 1996) est tourné vers l'étude des caractéristiques des situations scolaires et des outils cognitifs favorisant les démarches de modélisation. Le deuxième courant (Tiberghien, 1994) a pour objectif d'étudier la construction du sens en situation et s'appuie sur des hypothèses relatives aux fonctionnements du savoir enseigné et des connaissances des élèves. C'est dans ce deuxième courant que j'inscris l'origine de mon cadre d'analyse et de conception.

L'analyse de la modélisation proposée par Tiberghien distingue deux mondes : le monde des objets et événements et le monde des théories et modèles. Le monde des objets et événements n'est constitué que des objets matériels et des événements perceptibles. Ces objets peuvent être des objets « scientifiques », construits ou reconstruits selon les besoins de la situation, généralement dans l'objectif de faciliter leur manipulation par les élèves (certains des objets manipulés à l'école sont même de purs produits scolaires, comme le discoptique, la maquette de l'œil, les lentilles, les lanternes d'optique¹, etc.). Ces objets ont bien souvent été décriés par les didacticiens, car ils favorisent des démarches du type « monstration » (Johsua & Dupin, 1993) ou provoquent des confusions entre les objets manipulés et leur modélisation (Gaidioz & Tiberghien, 2003). Ces objets peuvent également être des objets de la vie quotidienne, la difficulté étant alors de sélectionner les fonctions de ces objets qui seront étudiées sur la base des savoirs enseignés. La description de ces deux types d'objets et les événements associés se fait soit dans une langue scientifique, soit dans une langue quotidienne.

Dans cette approche, les explications et les prédictions qui sont produites par les élèves peuvent relever soit de théories et modèles scientifiques, soit de théories naïves (Tiberghien & al., 2002). Ces dernières, contrairement aux théories scientifiques, sont le plus souvent mobilisées inconsciemment, sans être explicitées. Ainsi les activités de modélisation mises en œuvre dans la vie quotidienne ne sont pas forcément en adéquation avec le point de vue scientifique. L'intérêt de cette catégorisation est d'avoir « *une base commune pour analyser le savoir à enseigner, le savoir effectivement enseigné et la compréhension par l'élève de ce savoir et du monde matériel* » (Tiberghien & al., 2003, p. 5). A partir d'une distinction des deux mondes, s'appuyant sur une étude de la modélisation en physique, les tenants de cette approche proposent de caractériser les discours des élèves selon s'ils relèvent de la physique ou de la vie quotidienne (Figure 1).

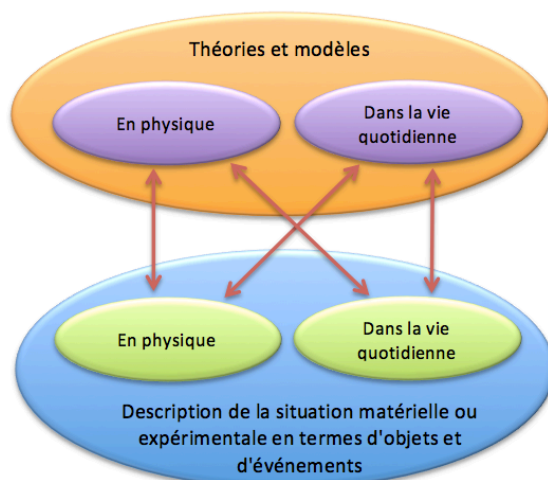


Figure 1: catégorisation des types de savoir selon Tiberghien & al., 2003

Cette catégorisation permet d'analyser les difficultés rencontrées par les élèves en lien avec des hypothèses fondées sur le fonctionnement de la physique. Par exemple, elle met en évidence que les descriptions attendues dans l'enseignement de la physique concernant les objets et événements en jeu dans la situation ne sont pas assimilables aux descriptions pertinentes dans la vie quotidienne même pour une situation familière (Tiberghien & Vince, 2002). L'apprentissage de la physique est lié aux

¹ Même lorsque les élèves manipulent des objets également connus dans la vie quotidienne, il arrive fréquemment que l'enseignant de sciences les apprête pour les manipuler : c'est par exemple le cas des socles utilisés pour fixer les lampes en électricité, des fils utilisés, qui ne comporte qu'un seul brin, contrairement à ceux utilisés au quotidien.

relations établies entre les théories et modèles physique et les objets et événements. En effet, les élèves arrivent en classe de physique en sachant décrire les objets et événements dans une langue quotidienne. Les objectifs de l'enseignement sont d'inciter peu à peu les élèves à décrire les objets et événements dans une langue scientifique, en mobilisant des connaissances relevant des théories et modèles de la physique. C'est dans cette mise en relation des concepts scientifiques et de la description des objets et événements que se situe la difficulté essentielle d'apprentissage.

Cette approche des activités de modélisation donne à étudier les activités des élèves à un moment donné, sans faire d'hypothèses sur les éléments conceptuels que les élèves auraient ou non intégrés au registre empirique. Elle propose également de considérer les théories et modèles naïfs comme relevant du monde des théories et modèles. L'analyse des différentes théories et modèles mobilisés sur un temps plus ou moins long met en évidence l'évolution des connaissances mobilisées en cours d'étude.

C'est sur la base de cette approche que j'ai développé le cadre épistémo-sémiotique au cœur de cette note de synthèse. Ce cadre a été mobilisé pour analyser des séquences d'enseignement-apprentissage², élaborées au cours de projets collaboratifs dont le fonctionnement sera explicité en première partie de ce document.

1.4 Caractérisation de l'étude ou de l'apprentissage ?

Le titre de ma note de synthèse mentionne l'étude et non l'apprentissage. En tant que didacticienne de la physique, je m'intéresse évidemment à l'enseignement et l'apprentissage de la physique, ces deux pôles étant intimement liés, le but de l'enseignement – et donc de l'enseignant - étant bien l'apprentissage des élèves. Or, à l'heure actuelle, nul chercheur (ou enseignant) ne peut certifier que les objectifs d'apprentissage fixés aient été atteints à l'issue d'un cours, et ce, quels que soient la qualité du cours ou les outils d'évaluation utilisés. Le type d'apprentissage évalué doit au préalable être défini (à court, moyen ou long terme) par le chercheur, des indicateurs objectifs doivent être précisés, et les relations entre le contexte, la situation d'évaluation et les connaissances mises en œuvre doivent être explicitées. Il est indéniable que nous apprenons tous, tout au long de notre vie, mais il est difficile de faire un lien causal objectif entre une situation d'enseignement ou de formation et un apprentissage. Pour autant, la didactique des sciences se dote peu à peu d'outils d'analyse des stratégies d'étude, en lien avec les disciplines d'enseignement, sur la base d'approches théoriques variées. Le choix du terme « étude » plutôt que « apprentissage » dans le titre de cette note de synthèse n'est donc pas anodin.

Le terme d'étude pour qualifier le travail réalisé par les élèves en classe me paraît plus approprié que celui d'apprentissage pour plusieurs raisons. D'un point de vue étymologique, le CNRTL³ indique que ce terme est directement emprunté au latin *studium*, et qui a pour synonyme application, soin, zèle.

² Une *séquence* correspond à une unité thématique de plusieurs semaines d'enseignement (par exemple : les circuits électriques comportant plusieurs récepteurs en cinquième, ou les lumières colorées en quatrième). Chaque séquence est composée de plusieurs *séances*, dont la durée correspond généralement à une plage horaire. Dans cette note de synthèse, je présenterai des situations d'enseignement-apprentissage conçues au sein de projets collaboratifs, qui sont des séquences complètes. Les analyses réalisées ont systématiquement porté sur l'implémentation de séances particulières, situées au regard des autres séances de la séquence d'enseignement.

³ Le CNRTL (Centre National de ressources textuelles et lexicales) fédère au sein d'un portail unique, un ensemble de ressources linguistiques informatisées et d'outils de traitement de la langue. <http://www.cnrtl.fr/>

Selon le TLF⁴, l'étude peut être un travail, un effort, un ensemble de travaux nécessaires à l'acquisition de connaissances, un lieu, un ensemble d'élèves. De ces définitions, je retiendrai pour mes recherches la définition de l'étude comme l'« *application méthodique de l'esprit, cherchant à comprendre et à apprendre* ». L'étude est donc prise comme un moyen indispensable à l'apprentissage. Cette définition pose également l'étude comme un processus, et non comme un état. Mon choix s'inscrit dans la lignée de celui de Chevallard (1995) pour qui l'étudiant est un sujet agissant, reconnaissant l'intérêt du projet proposé par l'enseignant : l'élève agissant dans le système didactique devient un *étudiant* (et non un apprenant, le terme étudiant n'étant pas à prendre au sens commun en français). « *Studying refers to the official role ascribed to the pupil in the teaching process: whenever a person comes to participate in such a process as a pupil, he or she will be made into a student. But an even subtler distinction should be posited at this point: I shall discriminate between "the student" and "the taught". "The taught" would point to the pupil in so far as he is subjected to the "teaching treatment"; "the student" refers to the pupil as someone who reacts to this treatment, by taking some definite course of action* » (Chevallard, 1988, p.1). Dans cette mouvance visant à caractériser les actions des élèves, il s'agit de se focaliser sur ce rôle d'étudiant qui est attribué à l'élève. Chevallard (ibid.) justifie l'usage du terme étude en lien avec la nature des données analysées et l'objectivité des interprétations qui en seront faites : « *Studying is a visible conduct, pertaining so to speak to the public sphere; whereas learning first and foremost belongs to the realm of private affairs and, for that reason, calls for a more complex investigation. In plainer language, studying is something one can see; learning, something one can only imagine, and maybe willing to assess* » (ibid., p.1). Ainsi, on ne peut qu'inférer l'apprentissage, qui est par nature privé, alors que l'étude est la partie visible, publique de l'activité des élèves. Enfin, le choix de qualifier les pratiques des élèves comme pratiques d'étude permet d'analyser en quoi les caractéristiques des situations mises en place par l'enseignant constituent ou non des aides à l'étude.

2 Organisation de la note de synthèse

Cette note de synthèse offre une double contribution à la recherche en didactique de la physique : un cadre théorique, dont les fondements ont été largement discutés dans la communauté de didactique des sciences en France et en Science Education à l'international, mais qui doit son originalité à la manière dont ses deux composantes (modélisation et représentation sémiotique) se combinent intimement ; et des résultats originaux, liés à la mobilisation de ce cadre, qui s'est révélé à la fois pertinent et fécond, tant en phase de conception de séquences d'enseignement qu'en phase d'analyse des pratiques d'études et d'enseignement.

Les recherches sur lesquelles s'appuie cette note de synthèse s'inscrivent pour la plupart dans le contexte de recherches collaboratives soutenues et financées par l'INRP⁵ – puis l'IFE⁶ – et la DGESCO⁷. Ce contexte de travail, qui n'est pas propre aux sciences de l'éducation, offre l'opportunité aux chercheurs en didactique, par exemple, de conduire leurs recherches dans un contexte effectif

⁴ Trésor de la Langue Française. Ce dictionnaire, initialement paru sous forme de 16 volumes entre 1971 et 1994, est le fruit de recherches linguistiques d'une centaine de chercheurs sur l'histoire et l'usage actuel du vocabulaire français. Le CNRS assure son accessibilité en ligne par le biais de l'UMR ATILF (Analyse et Traitement Informatique de la Langue Française, CNRS – Nancy Université). <http://atilf.atilf.fr/>

⁵ Institut National de Recherche Pédagogique

⁶ Institut Français de l'Éducation, École Normale Supérieure de Lyon

⁷ Direction Générale de l'Enseignement Scolaire, Ministère de l'Éducation Nationale

d'enseignement, en prenant appui sur les connaissances développées par des enseignants au cours de leurs interactions avec les élèves dans leurs classes, et de faire évoluer les connaissances didactiques élaborées sur la base des besoins et des retours d'expérience de ces enseignants. En échange, les enseignants ont la possibilité d'intégrer à leurs pratiques des résultats de la recherche, et d'avoir un retour réflexif sur les activités conduites avec leurs élèves.

Le contexte de recherche collaborative a une influence sur les séances conçues et analysées, ainsi que sur les résultats des analyses et leurs implications pour la pratique. Je focalise le chapitre 2 de ma note de synthèse sur quelques aspects essentiels pour situer mes collaborations, au regard des descriptions de quatre formes de recherches comparables aux miennes, et notamment la Design-Based Research (DBR).

Ces recherches ont toutes pour objectif de développer et d'étudier des séquences d'enseignement intégrant des résultats de recherche. Il a donc été nécessaire d'étudier les contextes institutionnels et matériels dans lesquels ces séquences allaient être implémentées. Lors de la conception collaborative, j'ai mobilisé des cadres théoriques relevant pour l'essentiel de la didactique des sciences et de la psychologie. En fonction des besoins éprouvés par les enseignants et les chercheurs, d'autres approches théoriques relevant de champs disciplinaires connexes ont été convoqués. Ces éléments, constituant ce que j'ai intitulé les contextes et ancrages théoriques, sont exposés dans le chapitre 3.

Parmi ces ancrages théoriques, deux composantes liées au fonctionnement de la physique et aux processus de communication et d'appropriation des contenus d'enseignement ont été plus particulièrement prises en considération pour construire mon cadre épistémologique : l'une de nature épistémologique et l'autre de nature sémiotique. Ces deux composantes, articulées au sein d'un même cadre théorique, ont été mobilisées tant dans la conception collaborative de séquences d'enseignement que dans les analyses des pratiques d'étude et d'enseignement : ces composantes constituent le cadre épistémologique-sémiotique (CES) qui est le focus de cette note de synthèse. Ce cadre épistémologique-sémiotique, est présenté dans le chapitre 4.

Dans le chapitre 5, je précise la manière dont le cadre épistémologique-sémiotique a été mobilisé pour la construction de séquences d'enseignement au lycée et au collège, dans le contexte de projets collaboratifs avec les enseignants. Cette conception a aussi bénéficié des éléments présentés au chapitre 3, mais seuls les apports du cadre épistémologique-sémiotique seront discutés dans cette note de synthèse. Ce chapitre est également l'occasion de présenter plus en détail les contenus et stratégies d'enseignement intégrés dans les séances conçues et analysées et dont les résultats sont rapportés dans cette note de synthèse.

Dans le chapitre 6, je présente une synthèse des nombreux résultats obtenus grâce à ce cadre épistémologique-sémiotique. Au cours de la première partie de ce chapitre, j'expose les méthodes développées pour collecter et traiter les données concernant les pratiques d'étude et d'enseignement. Je précise l'évolution de ces méthodes en fonction des objectifs de mes recherches. La deuxième partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus concernant l'analyse de l'étude, centrée sur les élèves, et ceux liés à l'analyse des actions du professeur en interaction avec les élèves et des productions issues de ces interactions. La présentation synthétique de ces résultats est organisée en fonction des éléments influençant les activités de modélisation ou de représentation.

L'articulation des chapitres 2 à 6 est représentée par la Figure 2. Au fil de ma note de synthèse et de ces cinq chapitres, cette figure mettra en évidence les éléments présentés.

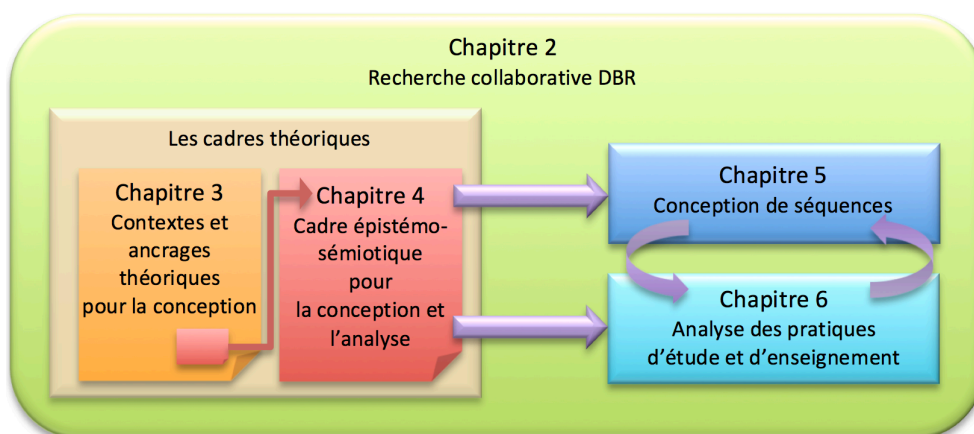


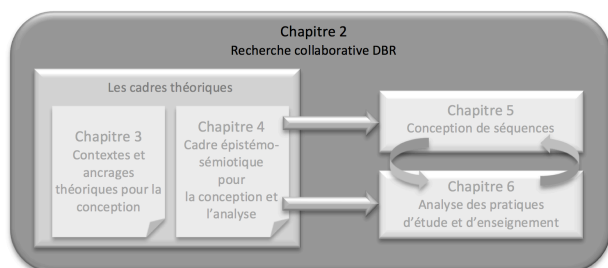
Figure 2: articulation des chapitres 2 à 6 de ma note de synthèse

Une synthèse thématique des principaux résultats liés à la mobilisation du cadre épistémologique est présentée au chapitre 7. Cette synthèse me permet de rassembler puis de discuter ces résultats au regard d'autres recherches. Ce point d'étape sur l'ensemble de mes travaux me conduit à envisager des évolutions de mon cadre épistémologique, des liens avec d'autres approches théoriques.

Enfin, je conclus ma note de synthèse en chapitre 8 sur les recherches que j'ai initiées, que je souhaite entreprendre ou diriger sur la conception et la réalisation d'activités en classe sur la base de ce cadre d'analyse.

- Chapitre 2 -

Un dispositif collaboratif



Ce chapitre précise le contexte dans lequel j'ai conduit mes recherches et développé mon cadre épistémologique. Ce contexte peut être rapproché d'autres méthodologies de recherches caractérisées par une collaboration entre chercheurs et enseignants. La description de mes projets passe par la définition des enjeux, des objectifs et des processus de ces recherches ainsi que des rôles assignés à chacun des acteurs. Cette présentation positionne mes recherches au regard de méthodologies collaboratives usuelles en sciences de l'éducation.

1 Introduction

Toutes mes recherches, depuis ma thèse de doctorat, prennent appui sur des projets visant la conception et l'implémentation d'activités d'enseignement de physique, par des groupes collaboratifs composés de chercheurs (essentiellement en didactique des sciences, et parfois en sciences cognitives) et d'enseignants du second degré⁸. Mon rôle en tant que chercheur a évolué selon les objectifs des recherches associées. A l'occasion de ce travail de relecture de mes travaux, je centre mes propos sur trois grands projets ayant pour objectif l'élaboration, l'implémentation et l'analyse de séquences d'enseignement conçues et discutées par des groupes associant, de manière contractuelle, des enseignants et des chercheurs. Le premier, intitulé « Energie », concerne le niveau du lycée. Il était relatif à l'enseignement de l'énergie en classe de première S. Les deux autres projets, intitulés « démarche » et « compétences » concernent le niveau du collège. Ils seront aussi nommés projets « collège » dans la suite de cette note de synthèse. Les analyses exposées sont relatives à l'enseignement de l'électricité et de l'optique en classes de cinquième et de quatrième. Des résultats liés à d'autres recherches seront plus ponctuellement mentionnés (voir Figure 3 pour l'ensemble des projets cités dans cette note de synthèse).

Dans ces contextes de travail, les partenaires, enseignants et chercheurs, s'engageaient :

1. à construire collectivement des séquences d'enseignements, prenant appui sur les expertises des chercheurs et des praticiens, et pouvant être utilisées dans des conditions ordinaires d'enseignement ;
2. pour les enseignants : à utiliser ces séquences dans les classes et à aider les chercheurs à collecter les données nécessaires à la recherche ;
3. pour les chercheurs : à analyser la mise en œuvre des séquences et à fournir un retour aux enseignants.

⁸ J'ai plus récemment entrepris des projets associant chercheurs en didactique et enseignants du premier et du second degré, mais les modalités de travail ont du être adaptées. Elles ne feront pas l'objet de cette note de synthèse (Aldon & Bécu-Robinault, 2013, voir Tome 2, p. 106 ; Boivin-Delpieu, Bécu-Robinault & Lautesse, 2014b).

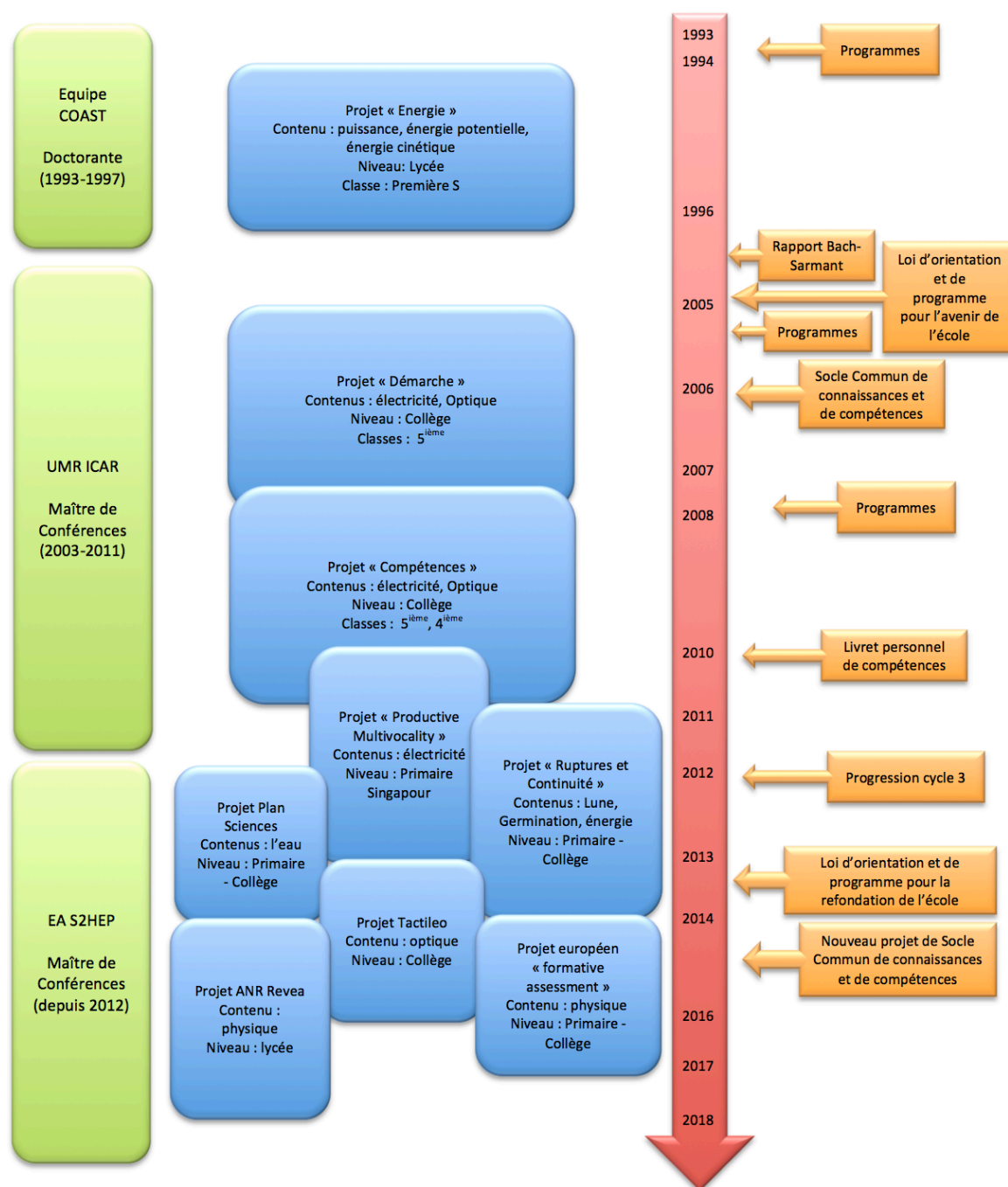


Figure 3: synthèse des projets que j'ai animés ou auxquels j'ai participé, en fonction des laboratoires de rattachement (à gauche) et des injonctions institutionnelles (à droite) dont l'évolution est souvent liée à ces projets.

Dans les projets « énergie » et « collège » susnommés, les séquences élaborées se devaient d'intégrer des résultats de la recherche en didactique mais aussi de respecter les contraintes relatives au contexte d'enseignement (instructions officielles, conditions matérielles de réalisation des activités dans les classes). Les résultats de recherche considérés comme pertinents et discutés avec les enseignants pouvaient concerner par exemple des hypothèses sur l'apprentissage, les difficultés récurrentes des élèves liées aux concepts ou aux modes de raisonnement, le fonctionnement de la discipline, les modes de communication associés aux concepts manipulés, la gestion de classe (voir chapitre 3).

Les activités d'enseignement développées étaient novatrices, au regard des pratiques habituelles, du fait de l'intégration simultanée des contraintes d'enseignement et des résultats de la recherche. Comme tout produit nouveau, les premières versions des activités étaient perfectibles. L'amélioration des productions était assurée par un processus itératif dans lequel chacun des acteurs pouvait avoir un rôle spécifique, lié à l'élaboration de la séance, son implémentation, son analyse. La durée d'une itération variait de quelques semaines à plusieurs années selon les possibilités d'implémentation dans les classes et les analyses effectuées. Les modifications des séances s'appuyaient à la fois sur les retours des enseignants et les résultats des recherches associées. Outre les propositions d'amélioration des séances d'enseignement conçues, les itérations successives alimentaient la recherche soit par des connaissances nouvelles, soit par de nouveaux questionnements. Les rôles des chercheurs et des enseignants au sein de ces projets étaient complémentaires du fait qu'ils travaillaient sur un objet commun tout en étant issus de communautés professionnelles différentes. Il est donc important de préciser les rôles de ces acteurs au regard des connaissances mobilisées ou des besoins exprimés. Les connaissances des enseignants sur leur établissement, leurs élèves, voire le contexte institutionnel ont souvent contribué au développement du cadre de conception et d'analyse présenté dans cette note de synthèse. Ainsi, mon cadre épistémo-sémiotique a émergé au sein d'une méthodologie de recherche collaborative que je me propose de situer et de décrire dans la suite de ce chapitre.

Cette forme de travail, associant praticiens et chercheurs, réunis autour d'un objectif commun de conception instrumentée par la recherche s'inscrit dans ce qui est décrit dans la littérature sous un terme générique de recherche collaborative.

2 Les recherches collaboratives en éducation

Le choix d'intégrer les enseignants à mes projets repose sur la volonté, partagée par d'autres chercheurs en sciences de l'éducation, de mettre à disposition de la communauté enseignante des résultats de la recherche jugés pertinents pour l'enseignement, et d'intégrer aux objets de la recherche les compétences spécifiques développées par les praticiens (Desgagné et Larouche, 2010). Toutefois, le suivi des implémentations par les enseignants génère une posture impliquée, voire ambiguë du chercheur, qui peut avoir des conséquences sur les recherches produites. Ces recherches collaboratives apparaissent dans la littérature sous des termes variés, selon leurs objectifs et l'implication des acteurs. Leur justification tient souvent aux critiques adressées aux chercheurs en éducation quant à leur capacité à améliorer l'enseignement sur la base des résultats de leurs recherches (Desgagné, 2007 ; Juuti & Lavonen, 2006).

2.1 Un enjeu pour la recherche en éducation

Les modalités de travail collaboratif que j'ai mises en œuvre viennent d'une ambition que je soutiens pour les recherches en éducation (agir avec et pour les acteurs du système éducatif), mais également de ma collaboration et intégration aux équipes de recherche de l'INRP puis de l'IFE, avec un souci d'interactions fortes avec la communauté enseignante. Ainsi, je m'inscris dans la mouvance des recherches pour l'éducation, avec une visée d'amélioration des pratiques d'enseignement et des conditions de l'apprentissage. Cette visée praxéologique ne se veut en aucun cas normative. Pour Bru (2002), l'explication de la non pertinence des transpositions de la recherche vers la pratique est liée au fait que les résultats de la recherche sont toujours intimement liés aux méthodologies adoptées, aux variables sélectionnées, la recherche ne pouvant prendre en charge la totale complexité des situations éducatives étudiées. Les résultats issus de la recherche sont de fait forcément limités. Les situations

pédagogiques à l'étude, quant à elles, reposent sur un tissu de contraintes et de possibles qu'il n'est pas possible de scinder. Toute décision sur une contrainte, ou un possible, a donc des conséquences sur des variables qui peuvent ne pas avoir été examinées par la recherche.

La légitimation des résultats est une interrogation partagée par toute forme de recherche, y compris en sciences de l'éducation. Dans la perspective de dépasser les logiques de classification des recherches en éducation, fondées sur les objectifs visés ou les démarches associées, Astolfi (1993) propose trois paradigmes pour les recherches en didactique.

- les recherches de faisabilité ont pour objectif de capitaliser les innovations, rendant compte de l'ensemble des possibles.
- Les recherches de signification sont tournées vers l'analyse de ce qui a été construit avec les enseignants. Les analyses conduites concernent tout autant les élèves que l'enseignant, car il s'agit de « *discuter, proposer, reprendre, affiner l'interprétation d'une séquence jusqu'au moment où cette interprétation « tient » aux yeux des différents participants : acteurs de la séquence, autres enseignants, chercheurs* » (Ibid., p. 10).
- Les recherches de régularité, qui concernent moins les recherches en didactique, visent à caractériser les éléments, les processus isolables et reproductibles, dans une démarche d'administration de la preuve.

Mes recherches se situent clairement dans le paradigme des *recherches de signification* et impliquent la participation active des enseignants, tant dans les phases d'élaboration que d'interprétation des données recueillies. Ces recherches sous-entendent une forme de vigilance de l'enseignant quant aux interprétations proposées par le chercheur, l'enseignant se voyant confier un contrôle de l'élaboration théorique produite par le chercheur.

2.2 Une posture « impliquée » du chercheur en éducation à justifier

Dans les projets collaboratifs entre chercheurs et enseignants, il s'agit de réduire la distance existant entre les savoirs théoriques issus de la recherche et les savoirs en acte issus de l'expérience professionnelle des enseignants (savoirs d'expérience). Du fait de l'attention particulière portée aux conditions d'enseignement et d'apprentissage, les résultats de ces recherches (qui sont pour l'essentiel des études de cas) ne se veulent pas généralisables. Dans ce contexte, les recherches produisent des innovations créant des conditions propices aux apprentissages, en adéquation avec des théories établies. L'explicitation des rôles de ces théories contribue à une formation des enseignants associés, légitimant le savoir d'expérience au cours d'une reconnaissance mutuelle des compétences des acteurs.

Desgagné (2007) propose de définir les recherches collaboratives en éducation selon trois critères :

1. La recherche collaborative suppose la co-construction d'un objet de connaissance entre un chercheur et des praticiens. Les enseignants, reconnus comme acteurs sociaux compétents, et les chercheurs s'engagent mutuellement à étudier un aspect de la pratique.
2. La recherche collaborative allie des activités de production de connaissances et de développement professionnel : le chercheur est en situation d'investigation, alors que l'enseignant est en situation de formation. Par moment, le chercheur peut donc cumuler des activités de chercheur et de formateur. La collaboration des enseignants à la recherche ne signifie pas pour autant que les enseignants soient appelés à faire de la recherche : « *il ne faut surtout pas tout confondre et faire en sorte que des praticiens se voient engagés à participer à des tâches de recherche pour lesquelles ils n'ont pas été formés, pour lesquelles aussi ils n'ont pas nécessairement d'intérêt à se*

former, le premier intérêt de la plupart d'entre eux étant, en tant que praticiens de l'enseignement, d'améliorer leurs pratiques, ce qui n'exige pas d'eux qu'ils apprennent à faire de la recherche systématique (selon les canons officiels reconnus) » (ibid, p. 379). Les deux acteurs de cette forme de recherche doivent contribuer, chacun sur la base de leur expertise, au bénéfice du projet dans lequel ils se sont engagés.

3. La recherche collaborative vise une médiation entre communauté de recherche et communauté de pratique. Cela oblige chacun des acteurs à comprendre le monde dans lequel l'autre évolue.

Les modalités de collaboration entre enseignants et chercheurs sont surtout décrites comme légitimant le savoir d'expérience tout en augmentant les connaissances sur la pratique (Desgagné & Larouche, 2010). Dans mes projets, la recherche collaborative n'était pas seulement un « *espace d'explicitation et de théorisation du savoir d'expérience des enseignants* » (ibid, p. 8), mais aussi le moyen de « *se reconnaître mutuellement un champ de compétence spécifique et le mettre au service de l'objet de recherche* » (Ibid, p. 8). Les deux champs de compétences, celui du chercheur et celui des enseignants, étaient effectivement sollicités.

La combinaison des activités du chercheur et de l'enseignant est parfois source d'ambiguïté quant au rôle de l'enseignant, sauf à définir comme relevant de la recherche toute démarche de questionnement sur un aspect de la pratique (Schön, 1993). Cette combinaison d'activités peut aussi conduire à des confusions entre recherche et formation. Pour que le projet ne se transforme pas en une formation collaborative uniquement, il est indispensable qu'il soit l'occasion d'une investigation formelle comprenant « *la définition d'un objet de recherche (sa situation dans un cadre théorique et dans un champ de recherche), d'une méthodologie de cueillette et d'analyse de données et d'une présentation de résultats* » (Desgagné, 2007). L'ambiguïté des rôles des acteurs au sein de ces projets a souvent conduit à discuter leur statut de recherche, tant du point de vue des objectifs que des méthodologies mises en œuvre.

Afin de préciser les rôles des acteurs au sein des recherches collaboratives, des typologies ont été élaborées : la recherche collaborative a ainsi été qualifiée de recherche herméneutique ou historique par Cardinet (1977) et De Landsheere (1982) avec des visées décisionnelles ou interprétatives (Dufays, 2006), ou de recherche-action par Sprenger-Charolles et al. (1987). Elle a alors pour fonction de « *solutionner des problèmes concrets et transformer la réalité. Elle s'inscrit dans la dynamique du changement et met en œuvre une méthodologie spécifique qui se caractérise essentiellement par l'intervention* » (ibid, p. 52). À travers ces dénominations, c'est la légitimité de ces recherches collaboratives qui est questionnée. Ainsi, le statut du chercheur au regard des objectifs d'accroissement des connaissances de la communauté, les méthodes qui servent ces objectifs, les approches théoriques qui sont mobilisés sont nécessairement transformés par la collaboration avec les praticiens. Ces modalités de recherche ont acquis aujourd'hui une véritable légitimité au niveau international, notamment sous l'appellation Design-Based Research (Design-Based Research Collective, 2003). Quant au rôle des enseignants, il est toujours questionné comme en témoigne l'ouvrage récent dirigé par Bednarz (2013) : « *on peut se demander si les acteurs, directement concernés par ces questions, n'ont pas eux aussi, un rôle à jouer dans l'éclairage et la compréhension de celles-ci. C'est ainsi la place des enseignants dans ces travaux qui est questionnée* » (ibid, p. 14).

3 Description et caractérisation de mes recherches

La première particularité de mon travail étant d'être collaboratif, je souhaite me positionner en relation avec des formes de recherche qui paraissent formalisées. Il est possible de catégoriser les formes de recherche collaboratives selon quatre dimensions :

- **Enjeux de la recherche pour les acteurs.** Qu'est-ce qui a motivé la recherche collaborative ? Qu'est-ce que les acteurs du projet ont à gagner à participer ?
- **Objectifs des acteurs.** Qu'est-ce qui motive les choix et les démarches des acteurs ? Qu'est-ce qui peut attester que les objectifs sont atteints et le projet mené à terme ?
- **Organisation du processus de recherche.** Comment les différentes phases, moments du processus de recherche collaborative sont-elles organisées ?
- **Rôles des enseignants et des chercheurs.** Quelles sont les actions conduites ? Quelle place est accordée à l'expertise de chacun ? Quelles sont les phases au cours desquelles les différents acteurs sont sollicités ?

Afin de situer mes projets de recherche, je décris et caractérise ci-dessous les pratiques de collaborations pratiquées au sein de ces projets selon ces quatre dimensions.

3.1 Enjeu de la recherche en didactique

En dépit de nombreuses recherches, même valorisées dans des revues professionnelles, sur l'enseignement, sur les difficultés associées à l'enseignement et à l'apprentissage de concepts donnés, sur les stratégies mises en œuvre par les élèves pour répondre aux tâches proposées par les enseignants, les résultats de la recherche en didactique des sciences semblent toujours peiner à trouver une place dans les séquences conçues par les enseignants⁹. Ces difficultés sont parfois interprétées comme un déficit de formation concernant l'intérêt de mobiliser ces résultats pour concevoir ou implémenter des séances d'enseignement, ou comme une difficulté des enseignants à s'en emparer, à trouver légitime (voire même seulement possible) de les adapter pour les rendre compatibles avec des pratiques existantes. Bien évidemment, les pratiques d'enseignement ne sont pas fondamentalement dysfonctionnelles du point de vue des enseignants, puisque la majeure partie des élèves apprend, selon les critères dont se dote habituellement l'éducation nationale. Pour autant, la consultation des forums de discussion à destination des enseignants de physique-chimie, les besoins déclarés en formation continue, le nombre de consultations des sites de mise à disposition d'activités ou de ressources de formation, indiquent que de nombreux enseignants sont en recherche d'éléments pour améliorer ou simplement assurer leurs pratiques.

Dans mes projets de recherche, la proposition faite à des enseignants de participer à un travail collaboratif avec des chercheurs en didactique présente un double enjeu :

- les enseignants produisent des séquences d'enseignement sur la base des résultats de la recherche, et s'approprient des outils fournissant un autre regard sur les processus d'étude de la physique ;
- les chercheurs font évoluer les connaissances issues de la didactique en confrontant les résultats des recherches à des contextes ordinaires : quels éléments du contexte peuvent ou non être pris en charge par la didactique, quels sont les résultats de la recherche pertinents pour enseigner, comment doivent-ils être adaptés, comment les enseignants se les approprient-ils, favorisent-ils réellement les processus d'étude...

⁹ On peut prendre l'exemple des conceptions des élèves, largement étudiées par les recherches en didactique depuis ses origines : si les enseignants, conscients de ces difficultés récurrentes et de leur impact sur la compréhension des phénomènes étudiés font souvent des recueils des idées préalables des élèves, ils peinent toutefois à mobiliser les résultats des recherches sur les conceptions pour construire leurs cours.

Ce double enjeu a des répercussions sur le fonctionnement des groupes de recherche collaborative et des relations étroites avec des modifications de programmes déstabilisant les pratiques usuelles des enseignants (Figure 3).

3.1.1 Le cas du projet « Énergie »

Dans le cas du projet « énergie » au lycée, l'enjeu pour les enseignants était de comprendre comment élaborer un dispositif d'enseignement en lien avec les modifications substantielles des programmes de première S (Bécu-Robinault & Tiberghien, 1998, voir Tome 2, p. 37). En effet, une refonte en profondeur reconfigurait alors l'intégralité du programme autour de deux thématiques (énergie et mouvement), avec une approche transphénoménologique de l'énergie et l'introduction des chaînes énergétiques : « *Le thème de l'énergie permet d'accéder à une grande loi de conservation qui sous-tend l'ensemble du travail de l'année, y compris en chimie. [...] L'analyse de chaînes énergétiques, et leur présentation sous forme d'un schéma conventionnel, est exploitée à chaque occasion possible tout au long de l'année* » (MEN, 1992, p. 32).

Pour les chercheurs, l'enjeu était de confronter des résultats déjà obtenus avec un dispositif testé avec des élèves de collège dans un contexte d'enseignement réel. Les résultats de recherche mobilisés provenaient de travaux antérieurs conduits par Andrée Tiberghien en collaboration avec des enseignants de collège. Ces travaux avaient notamment donné lieu à un mémoire de DEA réalisé par Pierre Gaidioz en 1987, sur la base d'une expérimentation concernant l'introduction d'un modèle énergétique auprès d'élèves de troisième. Ce modèle s'appuyait sur la représentation de chaînes énergétiques (Figure 4 et Figure 5).

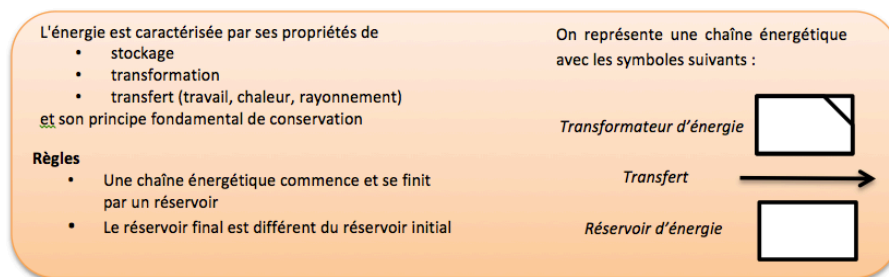


Figure 4: le modèle énergétique et les règles de fonctionnement et de représentation d'une chaîne énergétique

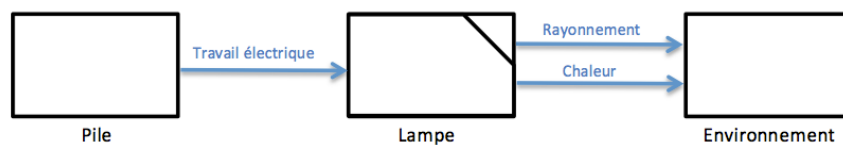


Figure 5: un exemple de chaîne énergétique expliquant l'usure de la pile dans un circuit simple (une pile, une lampe). Les flèches représentent des transferts d'énergie.

Lorsque les programmes de lycée ont introduit ces chaînes énergétiques en classe de première S, l'équipe de recherche d'Andrée Tiberghien (COAST) avait donc à disposition des éléments précis permettant d'outiller les enseignants sur l'introduction et la mise en œuvre des chaînes. Il était intéressant pour cette équipe pluridisciplinaire de recherche de saisir cette opportunité afin de prolonger les recherches sur d'autres terrains. Deux thèses ont été associées à ce projet « énergie » : celle de Gérard Collet, combinant des approches théoriques des sciences du langage et de la didactique (Collet, 1996) et la mienne, en didactique de la physique (Bécu-Robinault, 1997a).

3.1.2 Le cas des projets « Collège »

Dans le cas des projets « démarches » et « compétences » au collège, l'enjeu pour les enseignants était de s'approprier les injonctions relatives à de nouvelles modalités d'enseignement (forme des activités en classe, approche phénoménologique en cinquième), de manière à proposer des séances en conformité avec ces injonctions. Ces programmes s'inscrivent alors dans la continuité du rapport remis en 2004 (MEN, 2004), connu sous le nom de rapport « Bach-Sarmant » :

« La continuité avec les programmes de l'école primaire conduit :

- *A privilégier une pédagogie d'investigation pour l'ensemble des niveaux du collège*
- *A transférer vers la classe de cinquième l'étude de la propagation de la lumière et des ombres, de façon à ne pas laisser trop longtemps en friche ce domaine dont l'exploration est abordée au cycle 3 de l'école ;*
- *A faire progresser dans le programme de cinquième les connaissances sur la matière, mais en restant à un niveau de description macroscopique, et sur l'étude phénoménologique de l'électricité. » (Ibid., p. 8)*

La publication de ce rapport intervient peu après mon recrutement dans l'UMR ICAR. Au sein de cette unité de recherche, un groupe de recherche collaborative existait depuis plusieurs années au niveau du lycée¹⁰. Ce groupe élaborait des séquences d'enseignement sur la base d'une structure qu'il semblait possible, en première approche, de comparer à celle préconisée dans les programmes du collège. **Pour le chercheur, l'enjeu était de mobiliser les outils développés par ce groupe et d'étudier en quoi ils pouvaient ou non être adaptés au niveau du collège.** Prenant appui sur le rapport Bach-Sarmant puis sur la publication des programmes de 2005 (MEN, 2005), j'ai constitué un groupe collaboratif pour élaborer et analyser des séquences d'enseignement relatives au programme d'électricité et d'optique, initialement pour la classe de cinquième puis pour la classe de quatrième. Les temps de rencontres communs aux participants des projets Sésames au collège et au lycée étaient l'occasion de discuter et éventuellement mutualiser les méthodes de travail adoptées.

3.2 Objectifs des acteurs

En France, l'enseignant se doit de proposer à ses élèves des contenus d'enseignement en conformité avec les programmes officiels. Cette norme contraint les contenus proposés dans les séquences.

Dans les projets « énergie » et « collège », les contenus des séquences d'enseignement sont conformes aux programmes officiels. **Le premier objectif, commun aux enseignants et aux chercheurs était marqué par l'ambition de mettre à disposition des enseignants les productions élaborées en lien avec les instructions officielles.** Pour le projet « énergie », financé par la MAFPEN de Lyon, la diffusion fut assurée par des formations d'enseignants au plan académique, et la publication d'un ouvrage (Gaidioz & al., 1998). Pour le projet au collège, financé par l'INRP via la DGESCO, la mise à disposition des séquences et documents d'accompagnement fut assurée par des

¹⁰ Ce groupe « Sésames », co-animé par Andrée Tiberghien, Pierre Gaidioz et Jacques Vince, faisait suite au groupe « énergie » (auquel j'avais participé), puis « SOC (Son – Optique – Chimie) » dans lequel Jacques Vince avait conduit sa thèse et « Outils ». Ce dernier groupe doit son nom à l'ensemble d'outils produits au fil des précédents projets (Gaidioz & Tiberghien, 2003 ; Gaidioz & al., 2004 ; Vince & al., 2007).

formations proposées au Plan Académique de Formation et par le site Pégase ¹¹, hébergé par l'INRP, puis l'ENS (Figure 6).

En parallèle de cet objectif de production et de diffusion pour les praticiens de terrain, **les chercheurs poursuivaient un objectif de publication de résultats des recherches** (les miennes, ou celles des doctorants ou étudiants en master recherche associés au projet¹²). Ces résultats de recherche seront détaillés plus loin dans cette note de synthèse.



Figure 6: page d'accueil du site Pégase

Ces deux objectifs ne sont jamais disjoints. Ainsi, dans l'ouvrage paru à la suite du projet énergie (Gaidioz & al., 1998), des séances d'enseignement sont proposées, avec des compléments didactiques, dont j'ai co-rédigé un des chapitres en lien avec les résultats publiés dans ma thèse. Ces compléments explicitent les choix d'activités sur la base d'analyses fondées sur l'histoire des sciences et de résultats de la recherche en didactique. Des informations sont également fournies sur les pratiques d'étude des élèves en lien avec les activités proposées.

Concernant les projets au collège, le site Pégase fournit aux praticiens des contenus d'enseignement dans la partie « enseigner » et des documents visant à les informer des choix didactiques sous-jacents à ces contenus dans la partie « se former » (Figure 7). Par exemple, des fiches d'aide précisent le rôle des étapes successives au sein des démarches proposées aux élèves. Les deux parties du site sont interconnectées : les fiches sont accessibles à partir des activités d'enseignement, ou depuis l'espace dédié à la formation.

¹¹ Pour les Professeurs et leurs Elèves un Guide pour l'Apprentissage des Sciences et leur Enseignement, <http://pegase.ens-lyon.fr>

¹² Les doctorants qui ont réalisé leur thèse sur la base des réalisations de ce groupe sont : Zeynab Baddredine, Nada Souaissy, Suzane El Hage; Les étudiants ayant conduit leur mémoire de master au sein de ce groupe sont : Catherine Nallet, Christophe Driver, Clotilde Dequidt-Mercier, David Gelas.



Figure 7: articulation des deux parties du site Pégase pour les documents relatifs aux projets « collège »

3.3 Organisation du processus de recherche

Les processus de ces projets, au lycée et au collège, sont itératifs, les analyses des implémentations dans les classes permettant de modifier les productions initiales.

Au moment du projet « énergie », entre 1994 et 1996, la conception fut assurée par une équipe de trois enseignants (Pierre Gaidioz, Ginette Besson, Chantal Clavel) en étroite collaboration avec quatre chercheurs : Andrée Tiberghien, Jean-François Le Maréchal, Gérard Collet et moi-même. Les séances conçues furent ensuite présentées et discutées au cours de réunions mensuelles avec cinq autres enseignants. Lors de la première année, tous les enseignants mirent en œuvre dans leurs classes les séances, parfois avec un chercheur prenant des données vidéo et audio. Un premier bilan fut alors dressé sur la base des retours de chacun et des modifications furent apportées. La seconde année fut dédiée à l'élaboration des exercices, des évaluations. Le groupe a aussi examiné la continuité de ces séances avec la classe de terminale et rédigé tous les documents de diffusion. Suite à ce projet, un fonctionnement différent a été adopté pour les projets suivants, l'ensemble des enseignants contribuant à l'explication des contraintes, normes et pratiques (Veillard & al., 2011).

Concernant les projets au collège, la planification fut organisée en trois phases dans un processus itératif.

1. *La conception collaborative* des activités lors de réunions bimensuelles. Cette conception est assujettie à des résultats de la recherche, aux contraintes matérielles liées au terrain et aux injonctions institutionnelles.
2. *L'implémentation* de ces activités dans les classes des enseignants, et *le recueil de données*. Un questionnaire était à remplir après la séance en classe. Ce questionnaire portait sur des aspects concrets : temps mis pour réaliser l'activité, matériel utilisé, incompréhensions éventuelles des élèves quant à la formulation des questions, difficultés liées aux concepts, à la réalisation d'expériences. J'ai également procédé à des enregistrements vidéo de la réalisation des activités en classe pour un ou deux enseignants. Ces données ont été analysées, sur la base des approches théoriques mobilisées pour la conception des activités.
3. *Le débriefing* de ces activités fut conduit lors de réunions bimensuelles. Sur la base des observations réalisées, des questionnaires, d'analyses de ces données par les chercheurs, de retours d'expérience des enseignants, les participants proposaient alors des modifications à apporter aux activités, de façon à en produire une nouvelle version. Des adaptations successives ont souvent été faites au cours d'une même année. La pertinence des éléments théoriques mobilisés ou à intégrer était discutée.

Toutes les réunions étaient tournées vers la conception d'une ou plusieurs activités « clef en main » pour les enseignants. Cette production systématique et le processus itératif assuraient une adaptation graduelle des activités aux différents contextes d'enseignement tout en s'appuyant sur des résultats de la recherche. Ce fonctionnement a permis de progresser rapidement en direction des objectifs fixés, et de s'adapter aux imprévus, comme les réformes successives des programmes de physique du collège entre 2005 et 2008¹³.

3.4 Rôle des enseignants et des chercheurs

Mon rôle au sein des différents projets collaboratifs a évolué. Au cours de ma thèse, au sein du projet « énergie », j'étais surtout observatrice, même si j'ai contribué, de par mes analyses au choix des expériences et à une compréhension des difficultés des élèves lors de la construction des chaînes énergétiques. Ce projet « énergie » était alors animé par un chercheur en didactique des sciences, Andrée Tiberghien. Elle fut, selon l'expression des enseignants, une réelle force de proposition sur la forme et les contenus des activités conçues. Compte tenu des résultats déjà obtenus sur un contenu d'enseignement similaire au collège, elle a saisi l'opportunité offerte par les modifications de programmes en première scientifique pour constituer, en concertation avec les inspecteurs pédagogiques régionaux, un groupe de recherche collaborative qu'elle a co-animé avec Pierre Gaidioz, enseignant de sciences physique au lycée. Cette étroite collaboration, à laquelle ont été associées deux enseignantes (Ginette Besson et Chantal Clavel), a donné naissance à des séances d'enseignement, conformes aux injonctions sur l'introduction des chaînes énergétiques pour prédire et interpréter des phénomènes de transferts et transformations d'énergie. Un groupe de cinq autres enseignants eut ensuite pour fonction de commenter et mettre en œuvre ces séances. Dans ce contexte, je me suis focalisée sur deux séances : l'introduction du concept de puissance et l'interprétation de la chute libre.

¹³ Entre 2005 et 2008, trois programmes ont été publiés, modifiant les contenus de sciences physique : 25 Aout 2005, 19 Avril 2007, 28 Août 2008.

Concernant les projets « collège », j'en fus l'initiatrice puis la responsable, en charge de l'animation des groupes successifs de travail¹⁴. Chaque enseignant participant (dont l'expérience professionnelle variait de deux à dix ans¹⁵) contribuait au projet sur la base de ses connaissances, de son expérience professionnelle, du contexte local et de ses objectifs personnels. Les réunions bimensuelles précisaient les contenus à aborder, leur organisation, les dispositifs matériels, ainsi que la forme et les contenus des consignes à fournir aux élèves. J'apportais des éléments sur le fonctionnement des savoirs, les difficultés des élèves, des propositions pour lever ces difficultés et j'analysais les séances implémentées. Les enseignants discutaient la faisabilité, la pertinence, les intérêts et difficultés associées aux activités conçues. Selon leurs possibilités, ils implémentaient les séances dans leurs classes immédiatement après leur conception ou plus tard dans la même année. Du fait de la difficulté à produire des documents faisant consensus entre deux sphères professionnelles, des enseignants formés à la recherche, et donc à la frontière entre la recherche et l'enseignement, ont contribué significativement à ces projets. C'est Pierre Gaidioz, enseignant en lycée, qui a assuré cette fonction de 2005 à 2007. En 2007, c'est David Gelas, enseignant en collège, participant au groupe depuis deux ans, qui a pris le relais. Entre deux réunions du groupe, je travaillais avec ces enseignants, bénéficiant d'un mi-temps à l'INRP, pour synthétiser les décisions, produire un document d'accompagnement présentant la séance, les retours d'utilisation dans les classes et les compléments nécessaires à sa mise en œuvre. Ce document se devait d'être diffusable au delà du groupe de travail¹⁶. Tous les enseignants ont répondu aux questionnaires sur la réalisation des activités en classe, certains furent filmés, interviewés. Mes recherches ont alimenté, au même titre que les réponses aux questionnaires ou les retours plus informels des enseignants, les corrections apportées aux activités d'enseignement ainsi conçues.

3.5 Représentation synthétique des projets collaboratifs

Les enjeux de cette forme de recherche, les objectifs poursuivis par les enseignants et les chercheurs, le processus itératif de la recherche, ainsi que la répartition des rôles au sein des projets au collège ont fait l'objet d'une présentation lors d'un symposium à un colloque international (Bécu-Robinault, 2007b, Figure 8).

A travers ce schéma, je précise les rôles des chercheurs et des enseignants, le processus, les éléments (terrain, recherche, institution) mobilisés au cours de la phase de conception, l'objectif partagé par le groupe (production de ressources documentées en ligne) et les enjeux des enseignants et des chercheurs. L'enjeu des enseignants est ici d'implémenter des séances répondant aux demandes institutionnelles et au contexte (éventuellement s'appuyant sur la recherche), alors que l'enjeu des chercheurs est davantage tourné vers les analyses permettant la production de connaissances. Dans le chapitre 3 de cette note de synthèse, je préciserai la nature des éléments mobilisés dans la phase de conception : résultats de recherches, injonctions institutionnelles, contraintes du terrain.

¹⁴ D'autres chercheurs ont contribué plus ponctuellement à ce projet en fonction des besoins : Christian Buty concernant les logiciels de géométrie dynamique en optique pour la classe de quatrième, Eduardo Mortimer lorsqu'il était chercheur associé à ICAR, concernant la gestion des interactions en classe.

¹⁵ Les enseignants de collège qui ont participé aux différents projets « collège » entre 2005 et 2011 sont : Fabien Alibert, Cécile Bancel, Frédéric Baud†, Cécile Bochard, Christophe Driver, Isabelle Dumont, David Gelas, Clotilde Mercier-Dequidt, Marie-Eve Mestay-Auje, Catherine Nallet, Grégory Rochaix, Cécile Thiébaud-Chapuis, Julien Vialatte.

¹⁶ Dans la deuxième phase du projet, un enseignant (Joris Darphin), jouait le rôle de « testeur innocent » : il avait pour mission d'implémenter les séances conçues en s'appuyant sur ce document, et de faire état des difficultés rencontrées concernant sa compréhension ou sa mise en œuvre dans la classe.

Une revue de la littérature fait apparaître que la forme de recherche que j'ai entreprise peut être rapprochée d'autres formes de recherches collaboratives usuelles dans le champ de l'éducation.

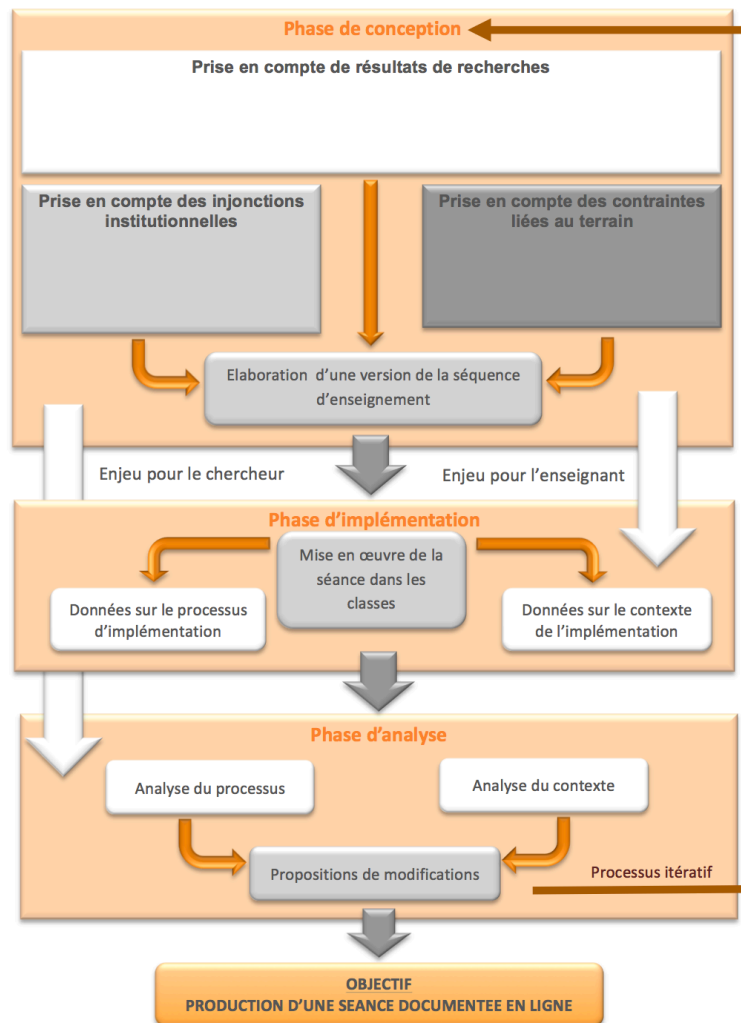


Figure 8: schéma récapitulatif de mes dispositifs de recherches. En blanc les éléments mobilisés à l'initiative du seul chercheur, en gris foncé les éléments soulevés par les enseignants, en gris clair ceux discutés par les enseignants et le chercheur. Les enjeux sont représentés par des flèches blanches : pour l'enseignant, l'enjeu est dans l'implémentation des séances, pour le chercheur, il est lié aux analyses.

4 Description de recherches collaboratives usuelles en éducation

Un nombre pléthorique de formes de recherches collaboratives est décrit dans la littérature. Quatre d'entre elles - l'ingénierie didactique, dont la dimension collaborative est discutable, la recherche-action, la recherche-développement et la Design-Based Research – présentent des similitudes avec les projets que je mène avec les enseignants. Si l'ingénierie didactique est très liée aux travaux francophones, les trois autres ont une dimension internationale.

4.1 L'ingénierie didactique

L'ingénierie didactique naît dans les années 80 d'une forme de travail en didactique des mathématiques proche du travail de l'ingénieur (Artigue, 1996). Elle se caractérise par un ancrage

dans les approches théoriques permettant l'ingénierie, notamment la théorie des situations didactiques (Brousseau, 1998).

L'enjeu est essentiellement tourné vers la recherche et la validation des connaissances scientifiques pour la production de matériaux d'enseignement.

Un des objectifs de l'ingénierie didactique est de discuter de la pertinence des variables didactiques de la situation, qui auront fait l'objet d'analyse *a priori* de la part du chercheur.

La méthodologie d'ingénierie didactique est structurée en quatre phases en relation avec la temporalité de l'expérimentation (Artigue, 1996). Ce processus est linéaire, et la chronologie des quatre phases ne peut être modifiée.

1. Une analyse préalable des contenus, des contraintes d'enseignement, des difficultés des élèves ;
2. Une analyse *a priori* fondée sur des hypothèses sur le rôle de variables de la situation, supposées pertinentes, non fixées par les contraintes d'enseignement, et sur lesquelles le chercheur va pouvoir agir ;
3. Une expérimentation en situation réelle permettant le recueil de données ;
4. Une analyse *a posteriori* et une évaluation, confrontant l'analyse *a priori* et les résultats de l'analyse *a posteriori*.

Le travail collaboratif au sein de l'ingénierie didactique est limité : toutes ces analyses sont conduites par les chercheurs, seule l'expérimentation est sous la responsabilité de praticiens dans leurs classes. Toutefois, la mise en œuvre de l'ingénierie par les enseignants suppose qu'ils partagent avec les chercheurs un certain nombre de connaissances.

Ce bref descriptif de cette méthodologie révèle des différences avec l'approche adoptée dans mes projets : d'une part, je n'ai jamais produit d'analyse *a priori* sur la base du rôle joué par des variables des situations ; d'autre part, les savoirs mobilisés n'étaient pas seulement issus de la didactique de la physique : il s'agit aussi de savoir-faire issus de la pratique des enseignants (Buty & Bécu-Robinault, 2010). Je ne peux donc situer mes recherches collaboratives comme étant strictement conformes à des ingénieries didactiques.

4.2 La recherche-action

La plupart des auteurs attribuent à Kurt Lewin la paternité de la *recherche-action* (Goyette & Lessard-Hébert, 1987 ; Dubost & Levy, 2002). L'intérêt initial porté par les chercheurs en éducation à ces formes de recherche est lié à leur potentiel de formation (Hugon & Siebel, 1987).

L'enjeu de cette forme de recherche est double : il s'agit pour les praticiens de dépasser une difficulté cruciale de manière à améliorer le fonctionnement de l'activité professionnelle et pour les chercheurs de contribuer à l'avancement du savoir dans sa communauté de recherche.

La recherche-action s'appuie sur un existant, un milieu naturel, une difficulté et un besoin d'amélioration du réel, pour le transformer en prenant appui sur l'expertise de deux types d'acteurs en interaction (Liu, 1997). La recherche-action poursuit donc l'objectif de transformer la réalité étudiée en développant des connaissances scientifiques sur cette réalité.

La recherche-action se conforme aux canons et à la rigueur des expérimentations scientifiques de laboratoire, tout en intégrant les éléments sociaux de la vie sociale réelle (Hardy & al., 2011).

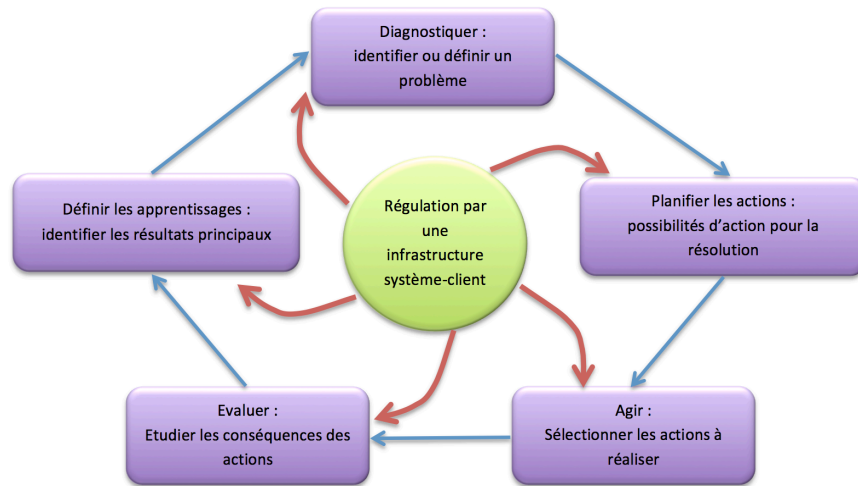


Figure 9 : processus cyclique de la recherche-action selon Susman & Evered (1978, p. 588)

Dans le processus cyclique décrit par Susman et Evered (1978), cinq phases sont identifiées (Figure 9) : le diagnostic, la planification des actions, la mise en œuvre des actions sélectionnées, l'évaluation des actions conduites, la définition des apprentissages permettant de diffuser vers d'autres contextes les savoirs développés. Une instance de régulation, *l'infrastructure système client*, a pour fonction de collecter et traiter les données collectées. Ce processus implique une immersion de longue durée du chercheur sur le terrain.

Les rôles des acteurs évoluent au cours du processus (Dubost & Levy, 2002) :

1. Au moment de la consultation, les acteurs de terrain formulent leur demande auprès des chercheurs-intervenants ;
2. Le moment d'analyse est celui où la recherche est à l'œuvre, sur la base des données recueillies sur les actions ;
3. Le moment de la communication des résultats associe des chercheurs et des praticiens, même si, *in fine*, les modalités de communication vers ces deux communautés sont différentes.
4. Enfin, le moment de la réflexion et de la critique relance le processus, en impliquant éventuellement d'autres partenaires, d'autres champs de connaissance.

En dépit des multiples tentatives de caractérisation des rôles (Goyette et Lessard-Hébert, 1987 ; Dubost & Levy, 2002), la plupart des auteurs reconnaissent le rôle ambigu des partenaires, qui permet de ne pas cloisonner leurs expertises, mais au contraire de les combiner pour donner du sens aux différentes activités conduites les unes par rapport aux autres.

Dans mes recherches collaboratives, les objectifs de la recherche-action sont effectivement poursuivis. Toutefois, les aspects théoriques sont souvent adaptés aux contraintes d'utilisation par les enseignants (Bécu-Robinault & Buty, 2007). Si mes objectifs visent la diffusion des outils développés vers la communauté enseignante, je ne m'appuie pas systématiquement sur une difficulté cruciale des praticiens, ni sur une analyse préalable des pratiques existantes et des conditions de travail des enseignants. Par conséquent, je ne peux affirmer positionner mes recherches sans ambiguïté comme conformes aux critères de la recherche-action.

4.3 La recherche développement

La recherche développement ne doit pas être confondue avec la recherche et développement (R&D) qui réfère à une juxtaposition et non à une intégration des activités de recherche et de développement. La recherche développement recouvre un foisonnement d'appellations complexifiant son identification (Charlier & Henri, 2007 ; Harvey & Loïselle, 2009 ; Loïselle & Harvey, 2007 ; Van der Maren, 1999).

Dans tous les cas, les enjeux sont tournés vers les praticiens, de par le produit ou les pratiques que cette forme de recherche s'engage à développer pour les praticiens à terme (Van der Maren, 2004).

Les objectifs de la recherche développement sont autant tournés vers la réalisation d'un produit (répondant à un besoin des praticiens) que vers l'analyse des activités pour mettre en œuvre ce produit.

Harvey et Loïselle (2009) décrivent le processus de la recherche développement comme itératif, le produit conçu étant amélioré au fil des analyses conduites (Figure 10).



Figure 10: modèle de la recherche développement selon Harvey et Loïselle (2009, p. 110)

Après l'étape dédiée à l'identification du problème ou de l'idée à la source du projet, l'étape *référentiel* consiste à faire une revue de la littérature en lien avec la recherche entreprise. Cette étape permet de mieux cerner le produit à développer. L'étape *méthodologie* précise les types de données à collecter et leurs analyses. L'étape itérative d'*opérationnalisation* est dédiée à l'élaboration, la réalisation, l'implémentation, et l'éventuelle validation du produit. Lors de la dernière étape, le chercheur rassemble les données collectées, interprète les résultats obtenus et les communique en explicitant les décisions prises en cours de développement.

Les praticiens, dont la participation garantit l'adéquation des produits conçus aux besoins du terrain, ne sont pas nécessairement impliqués dans toutes les étapes de la recherche développement. Cette forme de recherche met à l'épreuve la subjectivité du chercheur-développeur, du fait qu'il est au cœur des décisions qui sous-tendent le produit développé (Loïselle, 2001).

Mes projets collaboratifs respectent la succession des actions décrites dans le modèle de la recherche développement. Pourtant, je ne peux affirmer réaliser l'ambition pleine d'une telle démarche. En effet, il est souvent difficile d'identifier les acteurs à l'origine des choix de développement : le chercheur souhaite tester en quoi les résultats mobilisés permettent de structurer les contenus d'enseignement, sans que ce besoin soit exprimé par les enseignants. De plus, les résultats de recherche sont adaptés,

transformés pour être acceptés et utilisés par les enseignants dans leurs pratiques ordinaires. Les résultats des recherches associés aux projets dépassent donc la simple réalisation d'un produit adapté aux besoins des acteurs.

4.4 La Design-Based Research

La Design-Based Research (DBR dans la suite de notre texte) est une méthodologie qui a été largement discutée par les chercheurs en *science education* (Amiel & Reeves, 2008 ; Design-Based Research Collective, 2003 ; Wang & Hannafin, 2005).

La DBR est née du paradoxe entre l'opposition des enseignants à appliquer les innovations produites par la recherche et leur intérêt pour les résultats issus de la recherche expérimentale en éducation (Juuti & Lavonen, 2006)¹⁷. L'enjeu de la DBR est double : mobiliser la recherche pour élaborer des outils au service des pratiques quotidiennes des enseignants et développer des connaissances scientifiques, sur la base de l'analyse des outils produits. L'intérêt de ces derniers dépasse donc le cadre de l'expérimentation initiale.

Les objectifs de la DBR sont simultanément tournés vers l'exploration de solutions à des problèmes rencontrés par des praticiens et l'élaboration ou l'adaptation de théories permettant d'élaborer ces solutions adaptées aux conditions réelles d'enseignement (Amiel & Reeves, 2008 ; Sandoval & Bell, 2004).

Les méthodes mises en œuvre par la DBR sont tout à la fois flexibles, mais systématiques, basées sur des itérations entre analyse, conception et implémentation, ainsi que sur une collaboration entre des chercheurs et des praticiens de terrain (Figure 11).

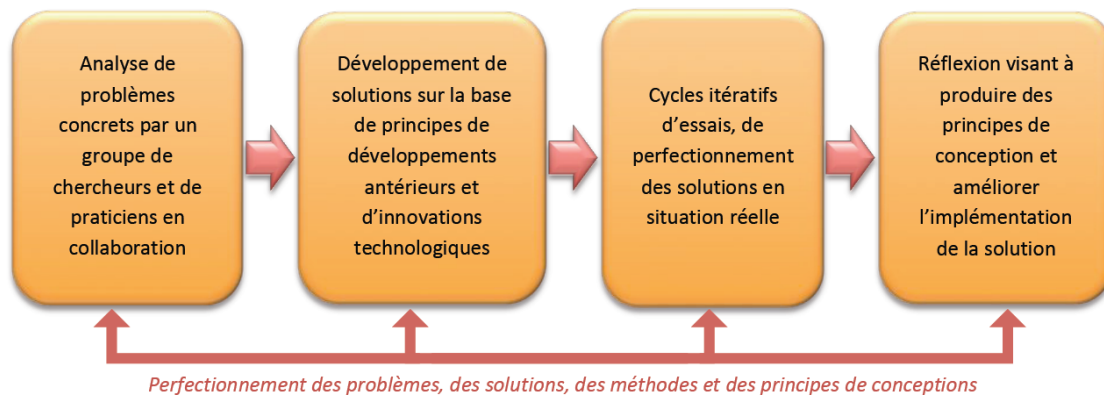


Figure 11 : le schéma de la Design-Based Research d'après Amiel et Reeves (2008, p. 34)

La méthode se doit de répondre à cinq caractéristiques :

1. les objectifs de conception de l'environnement d'apprentissage (la production) et de développement de théories sur l'apprentissage sont imbriqués ;

¹⁷ Cette certitude quant aux vertus de cette forme de recherche s'explique : la recherche expérimentale obéit aux canons de la recherche scientifique telle qu'elle a été présentée aux enseignants de science lors de leur formation initiale (Ratcliffe & al. 2004)

2. le développement et la recherche sont inscrits dans un processus continu et itératif de conception, implémentation, adaptation, analyse ;
3. la recherche sur la production doit aboutir à des théories diffusables, de manière à communiquer les implications pertinentes vers des praticiens ou d'autres concepteurs ;
4. la recherche doit justifier de la manière dont la production fonctionne dans des situations réelles ;
5. les justifications reposent sur des méthodes qui explicitent le processus d'implémentation et l'articulent avec les résultats pertinents pour la recherche.

Wang et Hannafin (2005) énoncent neuf principes pour identifier les rôles des participants (chercheurs et praticiens) tout au long du processus.

- **Principe 1** : Mobiliser la recherche dès le début du processus de conception, adaptation d'une théorie existante ou élaboration d'une nouvelle.
- **Principe 2** : Fixer les objectifs concrets liés au développement de la théorie.
- **Principe 3** : Conduire la recherche dans des dispositifs représentatifs du monde réel.
- **Principe 4** : Construire un dispositif collaboratif dans lequel tous les participants sont activement co-constructeurs.
- **Principe 5** : Mobiliser les méthodes de recherche systématiquement.
- **Principe 6** : Analyser les données immédiatement, continûment et rétrospectivement.
- **Principe 7** : Affiner la conception continuellement.
- **Principe 8** : Documenter les influences du contexte sur la conception.
- **Principe 9** : Valider la généralisation possible de la conception.

Cette méthodologie produit du matériel pédagogique véhiculant des résultats de la recherche utilisables par des praticiens en contexte réel d'enseignement. C'est là un des principaux objectifs que je poursuis au sein des groupes de travail collaboratif avec les enseignants.

D'autres caractéristiques de la DBR correspondent à la forme de mes projets : la recherche pilote l'élaboration des séquences d'enseignement ; les enseignants sont sollicités pour discuter la pertinence des résultats de recherche mobilisés ; les chercheurs s'engagent à collecter des données dans les classes, et les analyser rapidement de manière à améliorer les éléments conçus ; les enseignants documentent les conditions d'implémentation des séquences pour discuter les spécificités des contextes d'expérimentation. Toutefois, la variété des établissements dans lesquels les séquences sont testées (les groupes collaboratifs ont été parfois composés de 10 enseignants provenant de 10 établissements différents) rend cette documentation difficile et partielle : la généralisation des productions reste donc discutable et n'a pas donné lieu à publication¹⁸. Malgré ces limites, mes recherches s'apparentent aux cinq critères énoncés par le collectif Design-Based Research et s'inscrivent dans les sept premiers principes concernant le rôle des enseignants et des chercheurs. L'une des principales caractéristiques de mes recherches est le processus de conception itératif s'appuyant sur une collaboration étroite entre les acteurs.

¹⁸ Les séquences d'enseignement ont été téléchargées par un grand nombre d'enseignants. Les retours informels obtenus via les inspecteurs montrent que bien souvent, si la lettre de ces séances était respectée, l'esprit s'en éloignait souvent, en dépit des nombreux documents d'accompagnement précisant les hypothèses sous-jacentes à leur élaboration et les modalités de mises en œuvre de ces séquences...

5 Synthèse : comment qualifier mes recherches ?

Dès le début de mon doctorat, j'ai immédiatement perçu la richesse offerte par les collaborations entre chercheurs en didactique et enseignants pour la conception de séquences d'enseignement et la production d'une recherche à visée praxéologique. La forme prise par mes recherches est donc le fruit de cette expérience qui se poursuit aujourd'hui sur d'autres terrains de recherche¹⁹. L'exposé des quatre modalités de recherches collaboratives met en évidence que sous une appellation commune, les enjeux, les objectifs, les processus et le rôle joué par les acteurs sont variables. Certaines approches sont issues de questionnements des chercheurs, alors que d'autres prennent leur source dans des problèmes rencontrés par les praticiens ; les produits élaborés n'ont pas nécessairement les mêmes destinataires, en relation avec les enjeux de ces méthodologies ; la collaboration entre les acteurs dépend des phases de travail, de leur rôle dans les analyses... Cette variété de méthodologies, au service d'un objectif commun de production de savoirs et d'outils utiles tant à la communauté enseignante qu'à celle de la recherche en didactique des sciences, donne une fantastique liberté au chercheur que je suis quant aux modalités d'interactions avec les praticiens. Le Tableau 1 dresse un comparatif synthétique des quatre méthodologies et de celle que j'ai adoptée dans mes projets.

Mes objectifs de travail sont de concevoir des produits (séquences d'enseignement et documents d'accompagnement) répondant à des contraintes institutionnelles et de terrain ainsi que développer des connaissances relevant du champ de la didactique de la physique. Le processus dans lequel j'engage les enseignants partenaires des projets est toujours fondamentalement itératif, et n'ambitionne pas d'ouvrir à d'autres domaines de recherche, sans préjuger de l'intérêt de ces ouvertures. Le rôle des acteurs est clairement défini : les enseignants ne participent pas à la recherche, même s'ils discutent de la pertinence des résultats obtenus pour l'élaboration des séquences d'enseignement. Ils ont toutefois un rôle important pour l'élaboration des séquences et l'explicitation des contraintes de terrain (par exemple, recherche des formulations adéquates pour des élèves en difficultés, mobilisation des savoir-faire des élèves en fonction du matériel à disposition). En cela, leur rôle se rapproche de celui des enseignants en recherche-développement.

Les deux méthodologies « recherche développement » et « design-based research » ont des points communs évidents du fait de l'objectif commun de concevoir des produits²⁰, sur la base des résultats de la recherche, du processus itératif lié à l'intégration progressive des résultats des analyses. Toutes deux ont pour objectif de proposer aux praticiens des solutions répondant à des problèmes concrets, que ces problèmes aient été ou non explicités initialement par ces praticiens. La principale différence réside dans la production de connaissances scientifiques, qui est un objectif de la DBR, au même titre que la

¹⁹ Je conduis actuellement deux groupes collaboratifs : l'un dans une école et un collège ECLAIR (Écoles, collèges et lycées pour l'ambition et la réussite), la collaboration se jouant ici entre le chercheur, les enseignants de primaire et de collège, et l'autre avec des enseignants de collège dans un projet numérique innovant visant à concevoir des séquences d'enseignement intégrant l'utilisation d'interfaces tactiles et des objets tangibles.

²⁰ Notons toutefois que pour Loiselle et Harvey (2007), la recherche développement a pour but de développer ou d'améliorer un outil pour enseigner, un modèle, une stratégie, une intervention pédagogique. Les produits de la recherche développement sont donc très concrets. La design-based research quant à elle s'intéresse à toute la panoplie de interventions éducatives, des plus concrètes au plus abstraites, de l'artefact au curricula, en passant par les structures institutionnelles. Au delà de la conception proprement dite, la variété de ces produits de la DBR permet d'ouvrir des perspectives liées à l'exploration de nouveaux environnements d'enseignement et d'apprentissage, de développer des théories sur l'enseignement et l'apprentissage, de consolider les connaissances sur la conception de matériaux d'enseignement et d'accroître la capacité des chercheurs à proposer des innovations pédagogiques (Design-Based Research Collective, 2003).

solution développée. En ce sens, mon contexte de travail semble davantage se conformer à cette méthodologie, même si la documentation du contexte d'implémentation n'a pas toujours été suffisante pour justifier de la généralisation des solutions élaborées.

Tableau 1 : comparaison des quatre méthodologies de recherche et de ma méthodologie, selon leurs enjeux, objectifs, processus, le rôle des chercheurs et des praticiens

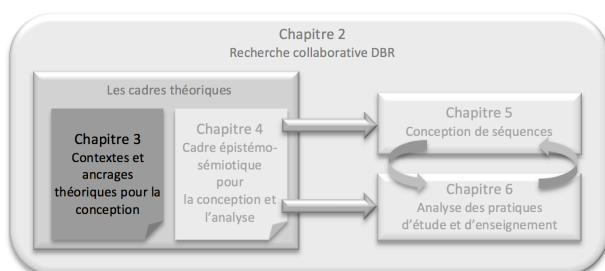
Méthodologie de recherche	Enjeux	Objectifs	Processus	Rôle des chercheurs	Rôle des enseignants
Ingénierie didactique	Produire et valider des connaissances	Confronter les résultats de la recherche à la complexité du terrain	Linéaire	Conception de la séance	Implémenter en conditions ordinaires
Recherche-action	Dépasser une difficulté cruciale rencontrée par les praticiens Elaborer des connaissances scientifiques	Transformer la réalité étudiée	Cyclique	S'immerger dans le terrain Conduire la recherche Transmettre les solutions vers la communauté des praticiens	Formuler une demande Participer aux analyses Implémenter les solutions
Recherche développement	Améliorer les pratiques sur la base de résultats de recherche	Concevoir un produit répondant à un besoin	Itératif	Développer un produit sur la base des résultats de la recherche Analyser les implémentations	Garantir l'adéquation au terrain du produit conçu Contribuer au développement
Design-Based Research	Mobiliser la recherche pour proposer des produits au service de pratiques ordinaires Produire des connaissances scientifiques	Concevoir des solutions répondant à un problème concret. Elaborer, adapter des théories relatives à ces solutions.	Itératif	Mobiliser les résultats de la recherche Concevoir un produit Conduire la recherche Valider la généralisation de l'utilisation du produit	Concevoir un produit Documenter le contexte d'implémentation
Ma méthodologie	Mobiliser la recherche pour proposer des produits au service de pratiques d'enseignement Développer des connaissances didactiques	Concevoir des séquences d'enseignement répondant à des contraintes institutionnelles et de terrain. Elaborer, adapter des théories relatives à l'implémentation de ces séquences.	Itératif	Mobiliser les résultats de la recherche Concevoir un produit Conduire la recherche	Expliciter les contraintes de terrain Contribuer au développement du produit Documenter le contexte d'implémentation

La manière dont je mène mes travaux de recherche n'est que partiellement conforme aux quatre méthodologies présentées. Il est pourtant important de positionner mes modalités de travail avec les enseignants par rapport à des méthodologies reconnues au sein des sciences de l'éducation, et de poursuivre ce qui me paraît une double finalité nécessaire de la recherche en didactique,

praxéologique et heuristique : élaborer des savoirs pratiques à destination des enseignants et des formateurs obéissant à un principe de pertinence, et contribuer à la création de connaissances fondamentales et à la réflexion critique des chercheurs, en étant soumis à un principe de rigueur scientifique (Dufays, 2006). Même si des différences apparaissent, la synthèse que j'ai faite me permet de m'inscrire globalement dans la lignée de la Design-Based Research. Une inscription dans la lignée de cette méthodologie incite à préciser comment les expertises des acteurs ont contribué au développement des projets, quels éléments du contexte ont été considérés, et éventuellement quelles étaient les positions du chercheur et des enseignants au sein de ces groupes, que j'appellerai *groupes collaboratifs DBR* dans la suite de cette note de synthèse.

- Chapitre 3 -

Conception de séances : contextes et ancrages théoriques



Cette partie précise l'ensemble des composantes théoriques qui ont été mobilisées pour la conception collaborative des séquences d'enseignement. Le choix d'intégration de ces composantes repose sur les besoins exprimés ou analysés des enseignants et sur l'analyse des activités des élèves au fil des implémentations des séances conçues.

1 Introduction

Ce chapitre retrace l'intégration progressive des composantes théoriques à mon cadre de conception de séquences d'enseignement. Le travail en collaboration avec des enseignants, dans l'objectif de construire des séquences et des outils directement applicables avec leurs élèves dans les classes, rend obligatoire la compréhension de leurs environnements local et institutionnel de travail, que ceux-ci contraignent l'activité ou bien qu'ils ouvrent de nouvelles opportunités. Je me suis donc systématiquement appuyée sur les aspects matériels et contextuels, qui rendent possibles et contraignent les activités proposées aux élèves, et les injonctions officielles qui bousculent et questionnent les pratiques quotidiennes des enseignants.

Au fil de ce chapitre, je décris comment les injonctions institutionnelles ont contribué aux objectifs des projets, puis quelles sont les contraintes au terrain qui ont été considérées. Ces éléments documentent le processus de conception en précisant en quoi les séquences développées sur la base de la recherche sont adaptées au contexte de travail et aux pratiques usuelles des enseignants. J'indiquerai enfin les résultats de la recherche mobilisés et adaptés pour concevoir les séquences d'enseignement.

2 Les injonctions institutionnelles

Les injonctions officielles ont souvent joué un rôle dans la construction des objectifs des projets de collaboratifs. La Figure 3, page 16, met en parallèle les projets rapportés dans cette note de synthèse et les injonctions officielles liées aux projets.

2.1 Une toile de fond pour l'enseignement des sciences

Le développement de séquences d'enseignement ne peut être envisagé indépendamment des objectifs généraux fournis en préambule des programmes officiels. Ainsi, toutes les séquences d'enseignement conçues au sein des projets collaboratifs DBR ont été développées de manière à donner aux élèves une vision de la science conforme à celle indiquée dans l'ensemble des programmes depuis une vingtaine

d'année : « *la science s'avère un instrument privilégié de cette formation [de base], parce qu'elle est école de structuration de l'esprit, susceptible d'aider durablement les élèves à observer, réfléchir, raisonner* » (B.O. spécial n°4 du 29 avril 2010, p. 1). Pour être implémentées par les enseignants du projet, et ensuite utilisées par une communauté plus large de praticiens, il était également fondamental que les séquences d'enseignement respectent les contraintes temporelles que les instructions officielles associent à chacune des thématiques. Ces directives ont évolué au cours du temps : en 2000, les programmes de seconde indiquent que la partie « exploration de l'espace » correspond à 10 heures en classe entière, et 5 TP ; en 2010, il n'y a plus aucune indication de durée ni de répartition de types de travaux. L'enseignant est libre de présenter les thématiques dans l'ordre qu'il souhaite, de manière linéaire ou non, « *la seule contrainte est qu'en fin d'année scolaire l'enseignement dispensé au travers des trois thèmes ait couvert l'ensemble des notions et contenus* » (ibid., p.3). De même, au collège, les instructions officielles de 2006, pour la cinquième, précisent une durée approximative de la partie « circuits électriques en courant continu » de 8 semaines. En 2008, les indications portent sur un pourcentage de temps à accorder à chacun des parties du programme (en cinquième : l'eau 50%, les circuits électriques 25% et la lumière 25%). Ces indications temporelles, même assouplies, contraignent le temps à consacrer aux activités, et implicitement, la forme des activités à proposer aux élèves.

En parallèle à ces injonctions usuelles dans l'enseignement français concernant les contenus à enseigner, d'autres directives ont peu à peu été associées, concernant les démarches et les modalités d'évaluation.

2.2 Le savoir à enseigner

Pour chacun des projets collaboratifs, un premier travail est l'identification, dans les instructions officielles, des thématiques posant des difficultés récurrentes. En parallèle, les solutions proposées par la recherche en didactique (ou en sciences de l'éducation) sont étudiées. Pour le lycée, les réformes engagées en 1994 ainsi que les recherches antérieures d'Andrée Tiberghien, ont naturellement guidé le choix du groupe collaboratif sur l'enseignement de l'énergie en classe de première S. Pour le collège, c'est le rapport Bach-Sarmant en 2004 qui a servi de support au choix de l'enseignement de l'électricité en cinquième, du fait de l'originalité de l'approche qualitative des concepts. Ainsi, dans un contexte institutionnel en perpétuelle évolution, les difficultés soulevées par les enseignants et reconnues par les chercheurs²¹ comme d'intérêt pour un projet collaboratif sont fréquemment liées à des refontes en profondeur des programmes.

Au lycée, le choix des contenus est lié à une réorganisation de la globalité du programme de première, passant d'un cloisonnement thématique, enfermant le concept d'énergie dans des terminologies adaptées à chacune de ces thématiques (chaleur, travail électrique, ...) à un enseignement positionnant la conservation de l'énergie comme porte d'entrée pour aborder les différentes formes d'énergie, et en conséquence les thématiques physique (mécanique, électricité....). Cette réforme des programmes trouve une explication dans la mise en conformité des savoirs à enseigner avec les savoirs académiques.

Au collège, l'origine de la recherche s'ancre davantage dans des réformes liées aux démarches d'enseignement. Le groupe d'enseignants était pour moitié constitué de néo-titulaires, ce qui a donné lieu à une répartition des rôles entre les enseignants : les plus expérimentés se sont positionnés comme

²¹ Les chercheurs dont je fait état ici sont autant ceux avec lesquels j'ai collaboré au sein des unités de recherche (Andrée Tiberghien, Jean-François Le Maréchal, Jacques Vince, Christian Buty) que d'autres avec lesquels j'ai échangé dans la communauté de didactique des sciences et des mathématiques en France.

expert de la gestion de classe, et les plus novices comme garants du respect des programmes. La recherche en didactique devant s'appuyer sur des contenus précis, il était nécessaire d'aborder le problème des démarches sur la base d'une thématique donnée, à savoir l'électricité dans un premier temps. Par la suite, d'autres thématiques ont été travaillées : l'eau, l'optique. Pour chacune de ces thématiques, un ensemble d'activité, répondant à des critères communs ont été conçues et diffusées via le site internet présenté au chapitre précédent (<http://pegase.inrp.fr>). Le respect des instructions officielles en matière de contenus rend possible la diffusion au niveau académique *via* les plans de formation. Cette diffusion n'a pas été utilisée à des fins de validation des outils élaborés.

2.2.1 Rénovation de l'enseignement des sciences

La constitution du groupe collaboratif DBR au collège est liée à la rénovation de l'enseignement des sciences au collège (MEN, 2004 ; MEN, 2005a). Les instructions officielles réforment en profondeur les programmes de sciences au collège, en préconisant, dans la continuité de ce qui était proposée à l'école primaire, le recours à une démarche d'investigation, la mise en place de thèmes de convergences et l'évaluation des compétences.

La démarche d'investigation et l'évaluation des compétences sont les deux injonctions intégrées et prises en charge dans les séquences d'enseignement développées. Ces injonctions soulevaient des questions tant du côté des enseignants que de celui du chercheur. En effet, je ne disposais pas, à ce moment, d'outils théoriques issus de ma communauté de recherche. Ces questions faisaient avant tout débat au regard de leur intérêt pour des recherches en didactique des sciences²² et de la manière dont les enseignants pouvaient s'en emparer. Pour le chercheur, l'enjeu à court terme était d'estimer en quoi les cadres théoriques déjà constitués étaient ou non adaptés à la conception de séances et d'analyser l'implémentation par les enseignants. Pour les enseignants, l'enjeu était de disposer d'un catalogue d'activités, de documents d'accompagnement, de grilles d'évaluation associées à mettre en œuvre dans les classes. Dans les paragraphes suivants, je précise comment les injonctions relatives aux démarches et aux évaluations ont été prises en charge au sein des projets. Les analyses conduites sur ces apports ont été présentées lors de colloques (Bécu-Robinault, 2009 ; Bécu-Robinault & Mercier-Dequidt, 2012[11]²³), publiées dans trois chapitres d'ouvrages collectifs (Bécu-Robinault & Gelas, 2014 ; Mercier-Dequidt & Bécu-Robinault, 2014 ; Loisy & al. 2014[15]), en association avec un master recherche que j'ai encadré (Mercier-Dequidt, 2010).

2.2.2 La démarche d'investigation

La démarche d'investigation a été introduite dans les programmes du collège en 2005 (MEN, 2005b) afin d'aider les élèves à développer un raisonnement scientifique. Sans que cette démarche soit présentée comme une norme, il est conseillé de la mettre en œuvre le plus fréquemment possible. Quelques années après son introduction officielle, le programme de 2008 (MEN, 2008a) précise n'imposer ni l'application systématique de la démarche d'investigation ni la manière de la mobiliser dans la classe, toutes les notions à étudier inscrites dans les programmes officiels ne se prêtant pas forcément à l'investigation. De nombreux chercheurs en didactique ont caractérisé et étudié son

²² Par exemple, en proposant une approche par compétences, commune aux différentes disciplines scientifiques, les contenus disciplinaires se trouvaient relégués en second plan, alors que les recherche en didactique se fondent sur la spécificité des modes d'élaboration et de communication des contenus disciplinaires.

²³ Les nombres entre crochets indiquent le numéro du texte intégral de la publication, disponible dans le Tome 2.

implémentation (Morge & Boilevin, 2007 ; Mathé, Méheut, & De Hosson, 2008 ; Boilevin, 2010 ; Calmettes, 2012).

La démarche d'investigation est décomposée en sept phases (MEN, 2005b) : choix d'une situation, appropriation par les élèves, formulation d'hypothèses et de protocole par les élèves, investigation et résolution du problème, argumentation, structuration des connaissances et mobilisation des connaissances. Chacune de ces phases est sous la responsabilité de l'élève ou de l'enseignant. Selon l'activité dans laquelle les élèves sont engagés, des stratégies itératives entre les phases sont envisagées. Ces itérations aident les élèves à prendre conscience que la démarche scientifique n'est pas linéaire, et qu'il est nécessaire de confronter continuellement les résultats de l'expérience aux théories sous-jacentes, aux prévisions et hypothèses. En ce sens, et parce que ces stratégies sous-entendent la mise en relation de points de vues théoriques et empiriques, la modélisation peut être assimilée à une démarche d'investigation (Morge & Boilevin, 2007). Dans les faits, les démarches d'investigation varient selon les enseignants, les situations, les connaissances à enseigner (Mathé, Méheut, & De Hosson, 2008).

Dans les instructions officielles, la démarche d'investigation est un moyen de discuter le mode d'élaboration des connaissances scientifiques. Les recherches en didactique ont montré que les élèves n'utilisent pas seulement les connaissances physiques lors de l'interprétation ou la prévision de phénomènes. D'autres connaissances, comme celles de la vie quotidienne, entrent en jeu, en fonction de la situation rencontrée, de la compréhension de l'élève du fonctionnement de la science scolaire. Elles ont alors un statut de modèle implicite. En classe de sciences physiques, l'enseignant attend des élèves qu'ils sachent décrire, prédire puis expliquer le fonctionnement des objets et des événements à partir d'éléments relevant du monde des théories et modèles scientifiques, exprimés dans la langue scientifique de la physique. Il est donc important d'aider les élèves à établir des relations entre les modèles élaborés en classe et les expérimentations réalisées, tout s'appuyant sur leurs autres connaissances et expériences (Bécu-Robinault, 2004). Les protocoles expérimentaux sont à discuter au regard des idées initiales des élèves, afin de donner du sens aux résultats obtenus par rapport aux prévisions et que les interprétations puissent être mises en relation avec les concepts en jeu. La décomposition en étapes de la démarche d'investigation ne doit donc pas être faite au détriment du sens global de la démarche scientifique scolaire dans laquelle les élèves s'engagent.

Afin de concevoir des activités en conformité avec les prescriptions sur les démarches d'investigation et les résultats de la recherche en didactique de la physique, un jeu de huit repères a été élaboré²⁴. Les cinq premiers sont liés à des résultats de la recherche, aujourd'hui largement partagés par la communauté de didactique des sciences : les conceptions des élèves, le travail collaboratif, l'articulation des connaissances naïves et scientifiques, la mise en relation des objets et des événements et avec les théories et modèles et enfin les coordinations de registres sémiotiques. Les trois derniers repères ont été élaborés progressivement sur la base des analyses des séances élaborées au sein des projets DBR au collège et concernent les compétences liées aux activités, la gestion de l'hétérogénéité et l'autoévaluation.

2.2.3 Les modalités d'évaluation

Toute modification des méthodes d'enseignement engendre par voie de conséquence une transformation des modalités et des critères de l'évaluation. Des prescriptions relatives à l'évaluation

²⁴ Ces repères sont détaillés dans un rapport publié en ligne : <http://ife.ens-lyon.fr/ife/ressources-et-services/ocep/dispositifs/socle-commun-et-evaluation-en-sciences-physiques-1/resultats-2010-2011>

par compétences ont été publiées au cours du premier projet collaboratif DBR au collège et ont influencé la forme des activités conçues.

L'évaluation des élèves est inscrite dans le code de l'éducation comme faisant partie des obligations de service des enseignants. En 2006 (DGES, 2006), les enseignants sont incités à évaluer non plus seulement des connaissances mais aussi des compétences disciplinaires et transversales. Dans la formation professionnelle, le développement de compétences est défini dans le rapport entre savoir et agir (Barbier, 1996). Dans le contexte scolaire, ce développement, qui ne doit pas être confondu avec des performances (Perrenoud, 1997), n'exclut pas les contenus disciplinaires : l'élève agit pour apprendre dans des situations lui laissant de l'initiative, tout en rationalisant les procédures mises en œuvre (Legendre, 2008). Ces injonctions sur l'évaluation des compétences s'inscrivent dans la validation du socle commun, conçu comme un minimum de connaissances et de compétences (Labudde, 2008) à acquérir à la fin de la scolarité obligatoire. Les textes publiés pour le brevet des collèges (MEN, 2009) laissent penser que les compétences sont observables en situation de classe ordinaire. Pour autant, l'évaluation des compétences n'est pas sans poser problème aux enseignants et à leurs élèves.

L'évaluation d'une connaissance, considérée comme traditionnelle dans l'enseignement, est un jugement recevable par un élève ; ce n'est pas le cas d'une compétence. Si le jugement de l'enseignant sur la production de l'élève n'est jamais exempt d'interprétations subjectives (Bressoux et Pansu, 2003), la conception d'instruments fiables pour mesurer les compétences est encore plus problématique, tant celles-ci sont difficiles à isoler du contexte précis dans lequel elles sont développées. De ce fait, le jugement d'incompétence peut être ressenti comme injuste par la personne qui le reçoit. L'évaluation des compétences peut surprendre les élèves qui, comme les enseignants, ne sont familiers ni des critères, ni mêmes des objets sur lesquels porte cette évaluation. Dans cette perspective, les outils d'autoévaluation aident les élèves à communiquer avec les enseignants sur les critères d'évaluation et les difficultés ressenties, et régulent les méta-connaissances en cours d'acquisition (Nunziati, 1990 ; Allal, 1993). La définition des critères d'auto-évaluation a également l'intérêt d'explicitier aux élèves les attentes de l'institution scolaire.

Les évaluations traditionnelles sont toujours mentionnées dans les textes officiels. Cela signifie que l'enseignant peut valider les compétences par le biais des évaluations habituellement pratiquées ou par d'autres biais. Il est par ailleurs précisé (MEN, 2011) que l'élève doit avoir eu un temps d'entraînement avant qu'une évaluation des connaissances ou des compétences ne lui soit proposée.

Les séquences d'enseignement conçues par le groupe collaboratif DBR ont été organisées en activités au fil desquelles les élèves élaborent, conjointement avec les autres élèves de la classe et l'enseignant, des éléments de savoirs se combinant progressivement pour élaborer ou faire évoluer un modèle. Pour chaque activité, les élèves sont invités à émettre des hypothèses, construire des protocoles, expérimenter afin de répondre à une question élaborée collectivement en début de séance. Chaque activité s'achève par un bilan, dont la formulation, tant au niveau du lexique à utiliser que de la signification, est discutée en classe entière puis dictée par l'enseignant. Afin d'intégrer les résultats des recherches sur l'évaluation, des auto-évaluations sont proposées, en lien avec le type de tâche conduit par les élèves dans chacune des activités. En accord avec les enseignants, un choix a été fait d'axer l'auto-évaluation sur deux aspects du socle commun, compatibles avec les composantes théoriques issues de la recherche : « pratiquer une démarche scientifique » et « manipuler et expérimenter en éprouvant la résistance du réel ». Les activités sont structurées pour donner à voir aux élèves la rationalité des étapes d'une démarche scientifique. Cette structure, évoluant en fonction des

compétences développées par les élèves et progressivement considérées comme acquises, est identique à celle de l'auto-évaluation de chaque activité.

3 Les contraintes de terrain

3.1 Des contraintes locales aux contraintes partagées

L'expertise des praticiens liée aux contraintes de terrain permet de confronter des propositions issues des résultats en sciences de l'éducation à des conditions matérielles et sociales souvent minorées par les chercheurs. Certaines de ces contraintes ont une valeur locale, comme les configurations des salles de classe, la présence d'un aide de laboratoire, le nombre d'élèves par classe et les répartitions des horaires réglementaires (constitution de groupes par exemple), ou encore les caractéristiques socio-culturelles des élèves. D'autres contraintes sont partagées par l'ensemble de la communauté enseignante comme le coût de certains dispositifs, les normes de sécurité à respecter, le temps à consacrer à chacune des parties du programme, la nécessité d'évaluer périodiquement et donc de structurer les thématiques en chapitres, ou encore de proposer des situations compréhensibles et motivantes.

Lors de la définition des objectifs des projets collaboratifs DBR et des rôles des participants, il a été nécessaire de préciser les contraintes de terrain que les résultats de la recherche en didactique pouvaient outiller ou documenter. Les contextes professionnels des praticiens participant aux projets étaient très divers : contexte urbain, rural, banlieue, collège ou cité scolaire, taille des établissements conduisant les enseignants à ne pas avoir de collègue dans la même discipline, présence ou non d'un aide de laboratoire... Il a donc été difficile de tenir compte des spécificités locales non partagées. Aussi, nous avons sélectionné, en concertation avec l'ensemble des participants aux projets, les contraintes partagées par la majorité des enseignants pour adapter la forme et les contenus des activités développées : la gestion de l'hétérogénéité, la nécessité de motiver les élèves, la disponibilité du matériel et la structuration des séquences. Ces contraintes partagées n'ont pas pour autant le même poids selon les contextes locaux d'enseignement. Il en résulte une difficulté à identifier, dans les activités conçues et analysées, ce qui permet de mettre en relation le bon fonctionnement de ces activités et les conditions locales. Il s'agit ici d'une limite à l'inscription de ces projets dans les critères de la Design-Based Research. Le nombre conséquent de téléchargements des activités conçues laisse néanmoins penser que l'adaptation de ces activités aux contraintes matérielles est réelle, même si, de manière générale, les activités « clé en main » sont toujours plébiscitées par enseignants (Charlier & Charlier, 1998).

3.2 De la gestion de l'hétérogénéité aux types d'activités proposées

L'hétérogénéité des connaissances des élèves en sciences a été systématiquement énoncée comme problématique par les enseignants de collège, alors qu'elle n'était pas considérée comme aussi gênante par les enseignants de lycée. Les raisons invoquées par les enseignants sont fréquemment liées à la construction du collège unique et aux continuités ou rupture de l'enseignement des sciences entre le primaire et le collège.

La réforme Haby du 11 juillet 1975 a instauré un collège unique scolarisant tous les élèves sans distinction jusqu'à l'âge de 16 ans, fin de la scolarité obligatoire, afin qu'ils bénéficient des mêmes enseignements. L'orientation différenciée, qu'elle soit scolaire ou professionnelle n'intervient qu'après

la dernière année de collège. Cette réforme, démocratisant l'enseignement au collège, a eu comme toute première conséquence, conjointement avec le développement de la scolarisation dans le secondaire, d'introduire une forte hétérogénéité dans les classes tant du point de vue des connaissances, des capacités, de la maturité des élèves que des milieux socioculturels dont ils sont originaires. Il est devenu rapidement indispensable à l'enseignant de trouver les moyens pour canaliser efficacement l'activité des élèves, quel que soit le niveau auquel celui-ci peut ou a envie de s'investir.

L'enseignement de la physique au collège revêt un caractère particulier : certains élèves de cinquième découvrent la physique pour la première fois, d'autres, moins nombreux, ont déjà suivi un enseignement scientifique à l'école élémentaire (Loarer, 2002). Il en résulte des écarts substantiels dans les connaissances scientifiques des élèves. Le programme de physique de cette classe intègre cette hétérogénéité, puisque l'approche choisie, exception faite des changements d'état de l'eau, est essentiellement phénoménologique. L'idée est de proposer des interprétations qualitatives sur les phénomènes observables, avant d'interpréter ces phénomènes en termes de grandeurs physiques en classe de quatrième puis de troisième.

L'hétérogénéité est une réalité de toutes les classes ; les différences entre élèves constituent la norme. Si les écarts de niveau entre les élèves sont impossibles à résorber – et des études tendraient à montrer qu'il n'est pas forcément souhaitable de rendre les classes homogènes (Duru-Bellat & Mingat, 1997) –, le groupe collaboratif DBR s'est appliqué à élaborer des stratégies pour gérer au mieux cette hétérogénéité sans perdre de vue les objectifs d'apprentissage assignés au collège. Les séquences comportent donc des activités supplémentaires à réaliser en autonomie : au cours de ces activités les élèves réinvestissent leurs connaissances dans une tâche différente de la tâche initiale. Cette adaptation permet à l'enseignant de maintenir l'attention des élèves sur la discipline en jeu, même lorsque tous les élèves ne travaillent pas au même rythme.

3.3 De la motivation à l'engagement disciplinaire productif

Les recherches en sciences de l'éducation sur la motivation répondent à une demande des praticiens, qui souhaitent à la fois capter l'intérêt des élèves lors de la présentation d'un nouveau contenu, et maintenir cet intérêt tout au long du processus d'étude. En didactique des sciences, les recherches pointent l'influence des cadres théoriques de référence pour analyser la motivation, ainsi que la nécessité de considérer la relation au savoir (Venturini, 2004 ; 2007). Les recherches associées aux projets collaboratifs DBR au lycée n'intégraient pas les aspects liés à la motivation, pourtant fondamentaux pour l'ensemble des enseignants participants aux projets au collège. Parmi les recherches qui semblaient fructueuses pour concevoir les séquences, celles relatives au *Productive Disciplinary Engagement* (Scott & Mortimer, 2006 ; Forman, Venturini & Ford, 2014) m'ont semblé particulièrement pertinentes, du fait qu'elles étaient également mobilisées par des chercheurs avec qui j'interagissais²⁵. Cette approche est compatible avec mes méthodes d'analyse des pratiques d'étude et d'enseignement, l'engagement étant défini comme « *aspects of learners' participation that can be directly accessed by researchers and practitioners. Specifically, a group of learners is more engaged to the extent that more of them are participating in an interaction, that participation has greater intensity, and each learner's participation is responsive to* ».

²⁵ J'ai collaboré avec ces deux chercheurs au fil de ma carrière. Eduardo Mortimer a été chercheur invité au sein de mon équipe (UMR ICAR – Adis Sciences) en 2004-2005, et j'avais participé à un projet européen (Labwork in Science Education) entre 1996 et 1998, auquel Phil Scott et John Leach avaient également participé. Cette ancienne collaboration nous avait conduit à présenter un symposium commun à ESERA 2007 « Designing, Implementing and Evaluating Science teaching-learning sequences: theoretical and empirical developments ».

that of others » (Engle, 2011, p. 4). Pour que l'engagement soit considéré comme disciplinaire, une relation doit être établie entre ce que les élèves font et les contenus et pratiques de la discipline en jeu. « *Productive disciplinary engagement occurs when students are strongly engaged in a discussion, when that discussion makes strong contact with the academic discipline or disciplines that they are learning about, and when intellectual progress is made over the course of the discussion* » (Engle & Faux, 2006, p. 2).

Dans le cadre de projets dédiés à la conception de séances d'enseignement, ce concept est utile à plus d'un titre. Tout d'abord, il est décrit comme pouvant aider la conception de séquences d'enseignement, même s'il a été élaboré initialement pour expliquer le cheminement des enseignants accompagnant leurs élèves lors de la mise en œuvre de leurs connaissances en classe (Engle & Conant, 2002). De plus, il donne des outils pour décrire non pas la motivation générale de l'élève, dont il est difficile d'identifier les causes et les remédiations, mais la manière dont l'activité conduite est en lien avec la discipline en jeu et aiderait donc l'étude. Enfin, ce concept considère l'élève en relation avec les autres élèves engagés dans la même activité. Engle et Conant (2002) énoncent quatre principes à respecter lors de la conception d'une séquence, de manière à promouvoir un engagement disciplinaire productif.

- **Problématisation du contenu** : l'enseignant encourage les élèves à formuler des problèmes, des questions, des défis, de manière à susciter leur curiosité. Il s'agit ici de présenter des situations à traiter dans une discipline donnée de manière à ce que les élèves puissent mettre en œuvre leurs propres connaissances.
- **Reconnaissance d'une certaine expertise des élèves, agentivité (authority)** : les élèves doivent se sentir légitimes lors de la définition, du traitement et de la résolution des problèmes traités. Le rôle des enseignants est de positionner les élèves comme décideurs ou contributeurs, en leur reconnaissant la possibilité de formuler des réponses, d'élaborer des procédures, de proposer des explications. Cette reconnaissance d'expertise, encourage les élèves, individuellement ou en groupe, à être producteurs de connaissances.
- **Responsabilisation vis à vis des autres et des normes disciplinaires** : l'enseignant accompagne les élèves, en fonction de l'expertise qui leur est reconnue, en s'assurant que leur travail est conforme aux attentes de la situation d'apprentissage, des normes disciplinaires telles qu'elles ont été travaillées en classe. Les élèves argumentent leur compréhension de la situation, en s'appuyant sur les points de vue de leurs pairs lorsqu'ils sont pertinents et les savoirs scientifiques préalablement étudiés. Cette responsabilisation vis à vis du savoir en jeu est à considérer au niveau de la classe, et non au niveau individuel, « *each member of a learning community is not an authority unto himself or herself, but one intellectual stakeholder among many in the classroom* » (ibid., p. 405).
- **Apport de ressources** : Il est nécessaire à un engagement disciplinaire productif et il garantit également l'incorporation des trois principes énoncés ci-dessus. Ces ressources sont de différentes natures, selon le problème à traiter.

Ces quatre principes ont été étudiés comme pouvant être mis en pratique spontanément par les enseignants dans leur classe (Amade-Escot & Venturini, 2010). Prenant appui sur ces principes, le groupe collaboratif DBR au collège a décidé de proposer des situations dans lesquelles les élèves pouvaient se reconnaître (en lien avec des questions de la vie quotidienne par exemple), et d'aider les élèves à construire les normes des activités attendues en structurant les différentes activités en étapes explicites, définies au fur et à mesure des besoins, des connaissances scientifiques disponibles, et évoluant au gré de la compréhension construite par la classe des démarches scientifiques. Avec de jeunes élèves, la relation à la discipline enseignée se construit aussi à travers la relation qu'ils ont avec

l'enseignant. La manière dont l'enseignant fait vivre son cours, organise la rencontre avec les savoirs est primordiale. Le rôle des interactions sociales dans la classe prend toute son importance avec des élèves qui ont besoin d'être à la fois rassurés mais aussi responsabilisés dans leur construction des connaissances. Le groupe collaboratif DBR a donc convenu de valoriser les connaissances formulées par les élèves par le biais de phases de discussion collectives, notamment lors de la formulation des hypothèses de manière à ce qu'ils s'approprient progressivement la manière dont les connaissances scientifiques sont élaborées.

3.4 Le matériel à disposition et la structuration des séquences

Dès le début des projets collaboratifs DBR au collège, les praticiens ont demandé à ce que les contraintes liées au matériel (disponibilité et coût des dispositifs expérimentaux notamment) et à la structuration des séquences et des activités soient respectées.

Mes recherches antérieures au cours de mon doctorat avaient montré que certaines expériences réalisées par les enseignants étaient utilisées de manière récurrente, en dépit des réformes curriculaires (Bécu-Robinault & Tiberghien, 1998[2]). Au cours du projet collaboratif DBR au lycée, des expérimentations similaires à celles habituellement utilisées par les enseignants ont été proposées et adaptées aux objectifs d'enseignement, aux nouvelles technologies à disposition. Les choix didactiques et les activités élaborées, soit sur la base du matériel disponible, soit avec des ouvertures vers d'autres supports, ont été présentés et discutés dans des colloques (par exemple, Bécu-Robinault, 2001 ; Bécu-Robinault, 2007b ; Bécu-Robinault, 2009 ; Bécu-Robinault & Gobara, 2010[9] ; Bécu-Robinault & Mercier-Dequidt, 2012[11]) ou des ouvrages collectifs (Gaidioz & al., 1998 ; Bécu-Robinault, 2007a[6] ; Bécu-Robinault & Gelas, 2014 ; Mercier-Dequidt & Bécu-Robinault, 2014).

Concernant la structuration, les enseignants, particulièrement au collège, souhaitent que chaque séance se termine par un bilan écrit en lien avec les activités conduites. En raison du faible volume horaire alloué aux sciences physiques au collège, cela évitait un temps trop long entre la réalisation des activités par les élèves et l'institutionnalisation. Ainsi, chaque activité, correspondant à une séance, a été conçue de manière à durer environ 55 minutes. Les impératifs d'évaluation ont conduit à structurer les chapitres en 4 à 8 activités, de manière à proposer des évaluations régulières. Les activités et les bilans associés sont autant de point d'ancrage pour les activités suivantes. Afin d'intégrer les productions des élèves dans les bilans, toutes les activités se décomposent en trois temps :

- *la réalisation de l'activité* par les élèves. Selon les cas, ces activités sont réalisées par groupe de deux ou quatre élèves. Les élèves écrivent leur réponse individuelle ou la réponse du groupe dans leur cahier. Dans tous les cas, une mise en commun est effectuée au sein du groupe avant de passer au temps suivant.
- *La formulation collective*. Il s'agit de faire émerger les différents points de vue des élèves en incitant les élèves à formuler leur réponse dans des termes compatibles avec la physique enseignée. Ce temps est essentiellement un moment de verbalisation, même si les mots introduits par les élèves sont écrits au tableau. L'enseignant s'appuie sur ces productions pour éventuellement introduire le vocabulaire adéquat, ou faire avancer le débat. Ce temps de formulation collective aide l'élève à se construire des repères, à situer ses productions par rapport au savoir académique. Les formulations collectives dépendent donc des connaissances explicitées au préalable par les élèves.
- *La réponse de la classe*. C'est le temps consacré à la correction écrite de l'activité : synthèse des observations, formulation de la conclusion avec le vocabulaire introduit au cours de la

formulation collective. Cette réponse de la classe est un temps préparant au bilan par l'enseignant.

La fin institutionnelle de l'activité est marquée par un temps de bilan, lors duquel l'enseignant formule les conclusions dans des termes compatibles avec le savoir académique. Autrement dit, les concepts sont nommés en conformité avec la terminologie adoptée dans les instructions officielles, même si la formulation des bilans est négociable avec les élèves pour se conformer à des formulations qui auraient fait l'objet d'un consensus.

4 Les résultats de recherche en didactique

4.1 Les types de recherches mobilisées

Les résultats de recherche que je souhaitais mobiliser prioritairement étaient relatifs à la modélisation (Bécu-Robinault, 1997b[1], 2002[3], 2004[4], 2007a ; Johsua & Dupin, 1994 ; Tiberghien, 1994 ; Martinand & al., 1992 ; Méheut, 1996), les conceptions et connaissances antérieures (par exemple la synthèse proposée par Tiberghien et al. 2002, mais tous les travaux sur les conceptions qui semblaient pertinents ont été mobilisés²⁶), au rôle de l'expérience (Bécu-Robinault, 1997a ; Bécu-Robinault & Tiberghien, 1998[2]; Johsua, 1989 ; Tiberghien & al., 2001 ; Welzel & al., 1998).

D'autres résultats ont été mobilisés en fonction des besoins exprimés par les enseignants ou des analyses de l'implémentation des séquences. Dans la suite, je regroupe ces résultats en trois ensembles, chacun étant relatif à un intérêt spécifique. Ce choix de présentation ne doit pas laisser penser à une étanchéité de chaque ensemble vis-à-vis des deux autres.

- **L'élève** : certains résultats relèvent d'hypothèses sur les éléments favorisant l'apprentissage, issus de la psychologie de l'éducation (postulats constructivistes, socio-constructivistes et socio-cognitifs) ou de recherches plus traditionnelles en didactique (conceptions, rapport à l'expérimental).
- **La classe** : ces résultats sont en lien avec les demandes des enseignants sur l'organisation du milieu et la gestion des interactions en classe.
- **La physique** : les résultats relevant de cet ensemble concernent le fonctionnement de la physique (dimension épistémologique pour justifier de l'intérêt de la modélisation), ainsi que les modalités de communication de ces savoirs (dimension sémiotique pour comprendre le rôle des représentations et de leur articulation)²⁷. Des aspects liés au rapport à l'expérimental ont également été intégrés.

²⁶ Une bibliographie sur les recherches internationales en lien avec les conceptions des élèves et des enseignants conséquente, est proposée par Reinders Duit, Université de Kiel : Students' and Teachers' Conceptions and Science Education. Cette bibliographie, dont la dernière mise à jour date de 2009 est consultable et téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/>

²⁷ Les modalités de communications telles que je les décris ne sont pas véritablement spécifiques du savoir. Par contre, ce que j'analyse à travers celles-ci sont les contenus de savoirs représentés, le sens qu'elles véhiculent et la manière dont elles peuvent se compléter pour donner du sens aux éléments du savoir en jeu. Cette partie sera développée dans le chapitre 4.

4.2 L'élève

4.2.1 Postulats issus de la psychologie de l'éducation

Les stratégies pédagogiques dans les séquences conçues s'appuient des hypothèses issues de la psychologie de l'éducation. A l'origine, c'est un postulat constructiviste (PIAGET), considérant que l'élève apprend en interagissant avec le milieu matériel dans des processus d'assimilation et d'accommodation, qui a guidé la conception des situations d'enseignement. Puis, ont été mobilisés des points de vue socio-constructivistes et historico-culturels, relatifs aux interactions sociales (VYGOTSKI, BRUNER), et des hypothèses relatives à l'apprentissage vicariant (modelage, BANDURA).

La mobilisation d'hypothèses purement constructivistes (PIAGET), positionnant le rapport au monde matériel comme essentiel, puis celle d'hypothèses intégrant les rapports sociaux peut être mise en relation avec le passage d'une démarche inductiviste de l'enseignement des sciences dans les années 60 (Johsua & Johsua 1987, 1988 ; Johsua, 1989) à une généralisation des injonctions à pratiquer des démarches d'investigation en classe dans les années 2000 qu'il est possible d'associer à des démarches de type hypothético-déductif²⁸. La démarche inductiviste peut, sous certaines conditions²⁹, être considérée en résonance avec un modèle naturaliste, proche du paradigme constructiviste de l'apprentissage, « *en s'appuyant sur l'évidence de la perception, l'élève acquerrait une connaissance contextualisée qui se transformerait, par un processus naturel d'abstraction, en une connaissance générale. Apprentissage naturel et mise en évidence expérimentale s'appuieraient ainsi mutuellement en fonctionnant de concert* » (Robardet, 1998). Même si ces démarches ont été fortement critiquées, les hypothèses, d'ordre psychologique, relatives à l'importance des interactions entre l'apprenant et le monde matériel restent valides. Elles sont d'ailleurs au cœur des recherches conduites en didactique sur les structurations du milieu (Margolinas, 2004) et ont sous-tendu les choix de consignes et de manipulation des séquences conçues lors des projets DBR.

Les préconisations concernant les démarches de types hypothético-déductives s'appuient également sur le postulat que l'immersion dans des pratiques sociales (ici scientifiques) favorise l'apprentissage. En ce sens, elles sont donc davantage en conformité avec des modèles historico-culturels de l'apprentissage dans la lignée des travaux francophones explorant les retombées de l'approche vygotskienne (Yvon & Zinchenko, 2011). Pour Vygostsky, tout apprentissage suppose l'appropriation d'outils (sémiotiques ou matériels) qui sont des productions culturelles véhiculant des schèmes de pensée, de valeurs de la

²⁸ Les instructions concernant les activités d'éveil en 1975 (INRDP, 1975) proposent que les démarches scientifiques à l'école élémentaires soient en conformité avec ce qui caractérise les démarches scientifiques, à savoir « le raisonnement déductif à partir d'hypothèses, le traitement mathématique des données expérimentales, le recours à l'expérimentation » (ibid., p. 34), tout en reconnaissant que « les enfants de l'école élémentaire, et même du premier cycle de l'enseignement secondaire ne disposent pas des outils intellectuels (techniques mathématiques, raisonnement déductif à partir d'hypothèse...) ou matériels qui sont la vie quotidienne du chercheur ou de l'ingénieur » (ibid., p. 33). Ces instructions proposent en conséquence une méthode dite de *découverte*, qui imbrique trois phases : 1) formulation d'un problème à partir d'une situation bien intégrée à l'expérience de l'enfant et qui permet l'étonnement et les questions individuelles ; confrontation et structuration collective pour la formulation d'un problème précis ; 2) recherche des éléments de réponse par construction, investigation et expérimentation, documentation. C'est une phase d'autonomie par rapport au maître ; 3) explication et organisation de l'acquis, réalisation de traces matérielles communicables. Ainsi décrites, ces activités d'éveil ne sont pas sans rappeler les étapes de la démarche d'investigation proposée en 2002 pour l'école élémentaire et 2006 pour le collège.

²⁹ Une de ces conditions est de laisser les élèves agir avec le matériel mis à disposition dans la situation afin d'induire une relation entre grandeur, phénomène, avec un minimum d'autonomie, sans le contraindre par des instructions strictes, l'obligeant à suivre un protocole pas à pas, le privant ainsi de réfléchir les actions conduites sur le matériel.

société. En transformant le milieu auquel il est confronté à l'aide d'outils (matériels ou mentaux), l'enfant, puis l'élève, se transforme lui-même. « *L'être humain se caractérise par le fait, d'une part, qu'il est capable de construire des outils (l'externe) et à travers ces outils de transformer le monde environnant et de transformer son propre fonctionnement psychique en construisant de nouvelles fonctions psychiques* » (Schneuwly, 2011)³⁰. L'appropriation de ces outils ne se conçoit pas indépendamment d'interactions sociales garantissant à la fois une utilisation conforme aux usages en vigueur dans la communauté et la construction de la signification de ces outils. En se saisissant des outils à disposition, les élèves sont amenés à modifier leur manière d'agir sur le milieu et rencontrer les usages sociaux de ces outils. Dans cette approche historico-culturelle, les savoirs scientifiques sont considérés comme des constructions humaines qui évoluent en fonction des interactions sociales et des outils mobilisés. Dans les séquences conçues au sein des projets collaboratifs DBR, les élèves sont confrontés à des pratiques scientifiques scolaires (l'ensemble de ces pratiques constituant la culture scientifique scolaire), intégrant leurs connaissances préalables. Ces démarches peuvent être qualifiées de démarches hypothético-déductives scolaires, les pratiques et outils mobilisés n'étant pas strictement conformes aux pratiques et outils développés et utilisés au sein de la communauté scientifique.

En lien avec les démarches d'enseignement en classe, mes recherches ont évolué d'une centration sur la structuration du milieu matériel vers l'intégration des interactions sociales. Dans mes recherches, ces interactions sociales étaient initialement conçues comme un moyen d'accès aux connaissances mises en œuvre par les élèves. Elles étaient donc intégrées à la méthodologie d'analyse. En effet, jusque dans les années 90, faire verbaliser les élèves en phase de résolution était une modalité d'expérimentation (associée à une méthodologie de la recherche) pour lever les implicites sur les connaissances mobilisées par les élèves. En les forçant à communiquer (soit en face à face, soit à distance), je considérais l'entité « groupe » comme l'entité apprenante, gommant ainsi les différences interindividuelles concernant les connaissances mises en œuvre lors de la résolution d'une tâche (Dillenbourg & al., 1996). Les recherches en didactique appréhendent désormais les verbalisations comme essentielles dans le processus d'apprentissage. L'intégration d'un paradigme historico-culturel m'a conduite à considérer ces interactions entre pairs comme favorisant l'apprentissage de par leur fonction interpsychique. Conformément à d'autres approches, comme le *Productive Disciplinary Engagement* présenté précédemment, ces interactions sociales sont des éléments participant de l'apprentissage et du développement, au même titre que les interactions avec le milieu matériel. Ces interactions sociales recouvrent, avec un rôle différent, les échanges avec les pairs et avec l'enseignant. L'organisation et l'analyse de ces deux types d'interactions sociales ne relèvent pas des mêmes hypothèses d'apprentissage, même si dans les deux cas, le langage est considéré comme essentiel du fait qu'il facilite la manipulation des objets et qu'il permet de contrôler son propre développement. Les interactions sont donc tripolaires, entre le sujet apprenant, la situation matérielle et l'autre (les pairs, l'enseignant dans le cas d'une situation d'enseignement). Les interactions avec les pairs ou l'enseignant remplissent des fonctions différentes au regard des pratiques d'étude :

³⁰ Dans ce chapitre, Bernard Schneuwly s'inscrit en faux contre l'appellation « socioconstructiste » de l'approche de Vygotsky, et prend appui sur les exemples de la grammaire et de la production de textes pour montrer que l'acquisition de savoirs académiques s'organise du haut vers le bas, du général systématique au particulier, et que l'enseignement ne peut se concevoir qu'en rupture avec les situations quotidiennes qui ont pour caractéristique de confronter les élèves à des situations de résolution de problèmes pratiques. Pour que le savoir soit transformateur, il est nécessaire qu'il soit externe, systématique, général et non construit par les élèves lors de situations préparées. Notons que la théorie de Vygotsky restant inachevée, « *il existe de nombreuses interprétations de ses idées en Russie et ailleurs. Il semble qu'avec le temps, l'interprétation de l'œuvre de Vygotsky ne soit pas devenue plus facile ou plus unanime; au contraire, on remarque que les commentaires et explications la rendent souvent encore plus complexe* » (Chaiguerova & al., 2011, p. 51).

- Conformément au modèle vygotkien, les interactions avec les pairs permettent d'envisager une double genèse des apprentissages : « *Chaque fonction psychique supérieure apparaît deux fois au cours du développement de l'enfant : d'abord comme activité collective, sociale et donc comme fonction interpsychique, puis la deuxième fois comme activité individuelle, comme propriété intérieure de la pensée de l'enfant, comme fonction intrapsychique* » (Vygotsky 1933 dans Bronckart 1985, p. 111). Les séquences conçues au sein des projets DBR favorisent les interactions portant sur les éléments en lien avec la culture scientifique scolaire de manière à les aider à construire du sens aux savoirs en jeu.
- Les interactions avec l'enseignant relèvent davantage des interactions de tutelle au sens de Bruner (1983), l'enseignant ajustant ses actions en fonction des comportements de l'élève, réduisant éventuellement le nombre de tâches à réaliser pour atteindre la solution, aidant les élèves à conduire des actions pertinentes pour aboutir à une solution, en évitant que les difficultés rencontrées ne se transforment en échec. Gagliardi (1998) précise que les aides apportées par l'enseignant en sciences expérimentales peuvent soutenir l'explication ou la confrontation des points de vue, introduire de nouvelles connaissances lorsqu'elles apparaissent nécessaires, ou inciter à réfléchir les spécificités du processus d'élaboration des connaissances disciplinaires. Ainsi, dans les séquences conçues au sein des projets collaboratifs, il ne s'agit pas de laisser les élèves agir en totale autonomie comme cela est parfois suggéré dans les activités de type *open-ended labwork* (par exemple, Berg & al., 2003), mais l'enseignant a pour mission de maintenir l'orientation des activités des élèves en fonction des objectifs d'enseignement.

Dans une perspective sociocognitive, les élèves apprennent en regardant une personne « modèle » agir de manière efficace dans une situation donnée³¹. C'est ce que Bandura nomme « modeling » (*modelage*) dans ses premiers travaux et qui sera ensuite plus connu sous le terme d'*apprentissage vicariant* : « *On entend par modelage tout un travail d'observation active par lequel, en extrayant les règles sous-jacentes aux styles de comportement observé, les gens construisent par eux-mêmes des modalités comportementales proches de celles qu'a manifestées le modèle et les dépassent en générant de nouvelles compétences et de nouveaux comportements, bien au-delà de ceux qui ont été observés* » (Carré, 2004, p. 25). Pour Bandura, le processus de modelage comporte quatre facettes (ibid.) :

- **l'attention** dépend à la fois des caractéristiques du modèle (proximité, qualités perceptibles et affectives, fonctionnelles, sociales et de l'observateur (capacités perceptives, attentes, motivations) ;
- **le travail de mémorisation**, en lien avec les possibilités de stockage, l'encodage symbolique, les caractéristiques de ce qui doit être mémorisé ;
- **le processus de reproduction** du comportement « modèle » dépend des capacités physiques et des connaissances de l'observateur, mais aussi de la capacité de celui-ci à auto-analyser le comportement qu'il reproduit ;
- **la motivation** de l'observateur apparaît enfin comme élément nécessaire tout au long du processus.

³¹ Cette approche s'apparente au compagnonnage : « L'apprentissage sur le tas s'appuie sur l'observation des travailleurs qualifiés par l'apprenti, suivie d'un entraînement personnel fait d'essais et d'erreurs corrigés. L'apprenti se tient sur le chantier, à proximité d'un compagnon qu'il prend en modèle, avant de tenter à son tour, quand il y sera autorisé, de réaliser des tâches de plus en plus difficiles. » (Tilman, 2007, p. 17).

Au sein des projets DBR, cette approche de l'apprentissage a donné du sens, du point de vue des apprentissages, aux expériences réalisées par les enseignants devant les élèves, par ailleurs souvent justifiées par le manque de matériel. Les facettes du processus de modelage fondent les critères pour choisir et organiser les expériences en lien avec les objectifs d'apprentissage. Par exemple, lorsque les objectifs d'apprentissages concernent la manipulation des objets, il était demandé aux élèves de reproduire les gestes de l'enseignant et observer les effets produits.

4.2.2 Les conceptions

Les conceptions, connaissances naïves, préalables, modes de raisonnement, « misconceptions » ou « alternative conceptions » au niveau international, ont fait l'objet de très nombreux travaux de recherche depuis l'émergence de la didactique des sciences (Viennot, 1998). C'est sans nul doute l'un des principaux apports de la didactique des sciences à la formation initiale et continue des maîtres que d'avoir catégorisé ces connaissances et montré leur résistance à l'enseignement. Ainsi, l'intégration des résultats de recherche sur les conceptions des élèves aide à concevoir des matériaux d'enseignement prenant en charge des difficultés des élèves. Vosniadou (1994) a montré qu'il ne suffisait pas de montrer aux élèves des faits allant à l'encontre des connaissances préalables des élèves pour dépasser ces difficultés, « *because it does not provide students with all the information they need to have in order to revise their naive theories. Such instruction can only lead to the accretion of inconsistent information in the knowledge base with all the unwanted implications earlier discussed* » (Ibid, p. 67). Ainsi, pour chaque thématique abordée au fil des projets (énergie, électricité, optique, changements d'états), une revue des principales conceptions a été effectuée et discutée avec les enseignants, de manière à intégrer à la situation des éléments pour mettre en relation les connaissances préalables et les connaissances visées.

Les premiers travaux sur les conceptions s'inscrivaient dans la continuité de la notion d'obstacle épistémologique de Bachelard pour qui la connaissance scientifique se construit en opposition à la connaissance commune. « *Face au réel, ce qu'on croit savoir clairement effusque ce qu'on devrait savoir. Quand il se présente à la culture scientifique, l'esprit n'est jamais jeune. Il est même très vieux, car il a l'âge de ses préjugés. Accéder à la science, c'est, spirituellement rajeunir, c'est accepter une mutation brusque qui doit contredire un passé* » (Bachelard, 1938, p. 13). De nombreuses recherches en didactique sur les conceptions considèrent que les connaissances scientifiques se construisent à la fois avec et contre les connaissances antérieures (Johsua & Dupin, 1993 ; Viennot, 1996). La difficulté à provoquer un changement conceptuel comme l'envisageait Posner (Posner & al., 1982) est à mettre en relation avec le fait que les idées préalables sont d'autant plus solides qu'elles se révèlent pertinentes pour résoudre des problèmes de la vie quotidienne. Ces derniers ne nécessitent pas d'établir de relations entre grandeurs physiques, de mobiliser des principes scientifiques, de recourir à des formalismes mathématiques. La difficulté des élèves à mobiliser les connaissances scientifiques serait liée à leur difficulté à identifier le contexte dans lequel elles sont nécessaires : « *the real problem of the differences between scientific concepts and those characteristics of everyday life have less to do with conceptual difficulties or misconceptions on the part of so-called naive subjects and more to do with the problem that people do not have access to contexts in which science talk is functional and necessary* » (Säljö, 1999, p. 90). Ainsi, il n'est pas tant question, comme cela est suggéré par Bachelard et les premiers travaux en didactique, d'éradiquer les connaissances communes au profit des connaissances scientifiques, mais de parvenir à identifier, en fonction des situations rencontrées, quelles sont les connaissances dont il est opportun de faire usage. « *Many so-called naive concepts and problem solution strategies are very helpful in almost all situations of daily life. Scientific reasoning is not in the position to replace commonsense thinking. Both types do complement each other. The student has to learn to discriminate in which situations which concepts and problem solution strategies are adequate. [...] The student should learn to see the limitations of each representation and to use them successfully in the appropriate contexts* » (Spada, 1994, p. 115). Ce point de vue peut s'apparenter à celui développé par Vosniadou (1994), pour qui les novices expliquent des

phénomènes similaires en mobilisant des connaissances reposant sur des cadres explicatifs distincts, alors que les experts mobilisent des connaissances scientifiques fournissant des explications stables à travers les différentes situations rencontrées. De plus, ces derniers ont conscience des hypothèses contraignant la manière dont ils interprètent l'information.

De nombreuses recherches en didactique ont été consacrées aux dispositifs aidant à surmonter les difficultés liées à la mobilisation des conceptions dans les processus d'étude. Certaines se centrent sur la résolution de situations-problèmes (Robardet, 2001) avec l'objectif de dépasser un obstacle préalablement identifié. Ces travaux n'ont pas véritablement identifié les conditions dans lesquelles un changement conceptuel peut s'opérer, à supposer qu'un tel changement soit possible. Fabre et Orange (1997) considèrent qu'une étude de la phase de problématisation, correspondant à la reconstruction des problèmes par les apprenants, permet de mieux comprendre les conditions didactiques du changement conceptuel : « *l'élève ne peut donner sens aux connaissances scientifiques qu'en les appréhendant comme solutions possibles de problématiques élaborées en classe* » (ibid., p. 55). Cette approche repose sur l'idée que tout savoir scientifique doit être fonctionnel. Par conséquent, il est nécessaire d'inciter les élèves à mobiliser les connaissances enseignées dans des situations variées (qu'il est possible de traiter sur la base des connaissances déjà enseignées) de manière à ce qu'ils construisent une portée de ces connaissances au-delà de la seule situation initiale, en reconnaissant les indices légitimant le recours aux connaissances scientifiques pour des tâches relatives à des familles de situations. « *This interpretation is consistent with recent theories of cognitive representation, such as mental models, that stress the existence of multiple representations competing for their activation in each task for each content. [...] science teaching should not be aimed at replacing commonness theories but making students more efficient in the contextual activation of their multiple alternative representations* » (Pozo, 1999, p. 163). Cela passe également par une réflexion sur les différences entre les connaissances scientifiques et les connaissances communes, tant du point de vue de leur fonctionnement que des concepts sur lesquels elles s'appuient. « *Science teaching should not aim to replace « misconceptions » by scientific concepts, but to make students reflect upon the conceptual and functional differences between two apparently overlapping systems of knowledge through the process of metacognitive awareness* » (Pozo, 1999, p. 172).

Dans le cas des projets collaboratifs DBR, les travaux sur les conceptions ont permis d'argumenter le choix des situations proposées, de légitimer les connaissances introduites au regard des connaissances préalables, et de prévoir les types de réponses fournies par les élèves. Dans les séances conçues, les connaissances préalables des élèves sont mises en défaut, justifiant ainsi de l'introduction de nouveaux termes, concepts, relations, les séances suivantes mobilisant ces connaissances dans des contextes différents. La portée des savoirs construits au regard des connaissances préalables est autant que possible discutée explicitement avec les élèves, en relation avec les situations proposées, les actions conduites. Ainsi, chaque activité conçue n'a pas pour objectif de provoquer à elle seule un changement conceptuel, mais c'est l'enchaînement des activités qui ambitionne de renforcer le champ d'application des connaissances introduites au fil des leçons.

4.3 La classe

Les hypothèses sur l'apprentissage que nous avons exposées dans la partie dédiée aux élèves ont des répercussions sur l'organisation de la classe de science.

4.3.1 L'organisation de la situation

Dans une perspective piagétienne constructiviste, le travail de l'enseignant est d'organiser les actions sur les éléments matériels et symboliques à disposition. Ainsi, l'enseignant construit une situation,

conçue comme un milieu pour apprendre (Brousseau, 1990 ; 2004), en s'appuyant sur l'hypothèse que les connaissances des élèves sont des moyens d'action donnant du sens aux savoirs en jeu³². Le milieu pour les élèves se construit sur la base des connaissances mobilisées et des actions conduites. Ainsi, les milieux de ces deux type d'acteurs (enseignant et élèves) de la relation didactique ne sont pas similaires (Johsua & Félix, 2002 ; Margolinas, 2004). La situation est organisée, sur la base d'une analyse *a priori*, de manière à ce que les éléments manipulés par l'élève lui renvoient des informations l'aidant à élaborer des connaissances en conformité avec les savoirs à enseigner. Cette structuration peut inciter l'élève à suivre un protocole déjà élaboré, à proposer du matériel, ou à proposer des tâches dans lesquelles le sens des actions se construit au fur et à mesure. Les approches constructivistes de l'apprentissage, postulant un lien entre action et connaissance, conduisent à proposer des environnements scolaires propices à la manipulation (Coquidé, 2000). Dans cette perspective, les interactions sont conçues dans une dimension bipolaire (le sujet épistémique interagissant avec une situation), dans laquelle le réel est reconstruit sur la base des connaissances du sujet. Le choix des objets à manipuler dans la situation construite par l'enseignant doit donc inciter chaque élève à s'engager dans la situation sur la base de connaissances issues de la vie quotidienne ou disciplinaires. Le milieu est ainsi envisagé d'un point de vue dynamique, résultant des interactions entre l'enseignant et les élèves dans un contexte et une culture donnés : « *le "milieu didactique" est un concept tissant les possibles et les nécessaires aller-retour entre l'ici et maintenant de l'action conjointe et les substrats historiques, collectifs et institutionnels qui en déterminent la dynamique* » (Amade-Escot & Venturini, 2009, p. 37). L'intérêt de cette dernière définition est de considérer les buts des élèves et de l'enseignant comme à la fois distincts et interdépendants.

Pour représenter les relations didactiques, il est d'usage de faire référence au triangle didactique, mettant en relation les différents protagonistes, le maître, l'élève et le savoir. Cette représentation est discutable et discutée. Il est évident que les trois protagonistes n'ont ni le même statut, ni le même rôle, ni les mêmes objectifs. Les relations qu'ils entretiennent n'ont de sens que si on prend en considération le contexte qui les incite à interagir dans cette relation didactique, par exemple l'institution scolaire. C'est ce qui amène Cornu et Vergnioux (1992) à ne pas considérer le savoir comme le troisième pôle de ce triangle. Pour ces auteurs, c'est l'institution qui devrait être positionnée en lieu et place du savoir. Boilevin (2010) émet des critiques sur cette représentation, du fait qu'elle n'intègre pas l'évolution des protagonistes au cours du temps, ainsi que des relations qu'ils entretiennent les uns avec les autres. Enfin si cette modélisation a pour intérêt de situer certains concepts de la didactique (Johsua & Dupin, 1993) et la posture adoptée par le chercheur (Toussaint, 1996), elle donne toutefois une image réductrice des objets de la recherche en didactique. « *La simplicité réductrice et myope du triangle didactique qui, en ne reconnaissant comme éléments des rapports didactiques que le savoir, l'apprenant et le médiateur, pousse le processus d'enseignement/apprentissage à l'auto-référence, à une attitude qui peut confiner à l'autisme. En effet, ce modèle, même lorsqu'on lui confère une dimension dynamique reste celui d'un système clos* » (Raïsky, 2001, p. 39). Malgré ces critiques, abordées explicitement dans que la théorie anthropologique du didactique de Chevallard (1992)³³, cette représentation offre pour avantage de matérialiser un postulat majeur pour la recherche

³² Dans le cas idéal, on peut espérer que ce milieu soit adidactique au sens de Brousseau (un milieu antagoniste, dans lequel la connaissance à acquérir serait complètement justifiée par les actions à conduire dans la situation proposée), même si l'existence de ce milieu adidactique a été discutée dans le cas de séances de classes ordinaires (Perrin-Glorian, 1999).

³³ Dans la TAD, les savoirs sont vus comme étant le produit de constructions humaines. La fonction de ces savoirs est liée aux lieux, aux sociétés, dans lesquels ils sont créés, mis en œuvre et évoluent. Les objets que le didacticien étudie vivent au sein d'institutions dont le didacticien est lui-même un sujet.

en didactique des sciences : la relation entre chacun des acteurs (maître et élève) ne peut se concevoir indépendamment du savoir en jeu dans l'interaction.

Les interactions en classe prennent du sens autour de la situation construite par l'enseignant et reconnue par les élèves comme milieu didactique. Ce milieu, dans un cours de physique, comprend par exemple le champ expérimental, les documents à disposition et les instructions, conseils, commentaires apportés par l'enseignant ou les autres élèves. Les connaissances de l'enseignant et des élèves étant différentes, les éléments qui composent le milieu ne sont pas identiques pour chacun d'eux.

Le milieu didactique inclut des contenus portés par d'autres modalités de communication. A l'instar de Forest (2006, p. 73), je considère que « *les modalités non verbales d'échange de significations entre le professeur et les élèves jouent un rôle non négligeable dans la qualité et l'efficacité de la relation didactique* ». Ces modalités sont d'autant plus importantes qu'elles sont souvent mobilisées dans des situations d'échanges quotidiens, créant ainsi un rapport de familiarité laissant croire que leur signification est triviale. Or, le plus souvent, cette familiarité constitue un obstacle à la compréhension des savoirs portés par ces modalités de communication, ces savoirs ayant des significations différentes pour des individus en interaction (De Landsheere & Delchambre, 1979).

Lors de la conception de séquences d'enseignement dans les projets collaboratifs DBR, seuls les éléments du milieu pour lesquels le savoir était central ont été étudiés. En effet, la mobilisation de ce concept, en phase de conception, avait pour objectif de produire des analyses *a priori* avec les enseignants de l'ensemble des éléments de la situation qui prennent du sens du point de vue des savoirs en jeu. Lors des analyses qui ont été réalisées, j'ai parfois intégré au milieu des aspects liés à l'organisation du groupe d'élèves (Projet Multivocality) ou à l'interdisciplinarité (Projet Plan Sciences).

4.3.2 Gestion des interactions en classe

Ainsi que je l'ai exposé précédemment dans la partie consacrée à la motivation et l'engagement disciplinaire productif, l'approche communicative (Mortimer & Scott, 2003) a servi de support dans les projets collaboratifs DBR pour proposer des phases d'interactions variées : confrontation des points de vue, élaboration de bilans collectifs, ou justification d'un discours parfois normatif de l'enseignant.

Cette approche dresse une typologie des formes de discours entre l'enseignant et les élèves selon deux axes: le premier caractérise le discours selon s'il est interactif ou non interactif et le deuxième selon s'il est dialogique ou autoritativ³⁴.

- La communication *interactive* articule la participation de l'enseignant et des élèves (ou de plusieurs personnes). Elle est *non-interactive* lorsqu'elle implique seulement l'enseignant, ou qu'elle exclue la participation de toute autre personne en dehors du premier locuteur. En référence à des situations usuelles, les séquences itératives de questions et de réponses sont définies comme un enseignement interactif, alors qu'un cours de type momentanément

³⁴ En anglais l'expression « authoritative discourse », pourrait se traduire par le discours qui fait autorité. Concernant les sciences, ou l'enseignement des sciences, il s'agit du discours dont le contenu scientifique est reconnu, attesté par la communauté scientifique, les programmes officiels ou celui qui fait autorité dans la classe car il est porté par l'enseignant. Dans ce dernier cas, le discours qui fait autorité dans la classe peut s'avérer différent du discours académique. Je conserverai dans la suite de cette note le terme « autoritativ » pour éviter toute confusion avec un discours « autoritaire » qui peut ne pas être conforme au savoir académique.

magistral lors duquel l'enseignant expose des idées est une forme d'enseignement non-interactif.

- Lorsque la communication est *dialogique*, l'enseignant est attentif aux idées formulées par les élèves, les reconnaît comme pouvant légitimement être discutées, au même titre que les savoirs plus académiques. Si l'enseignant ne semble pas faire cas des connaissances des élèves (par exemple si elles ne font pas avancer le savoir en jeu), et qu'elles sont soit ignorées soit reformulées différemment par l'enseignant, alors un seul le point de vue (celui de l'enseignant) est examiné dans le discours de la classe. La communication est qualifiée d'*autoritative*.

Ces deux dimensions combinées génèrent quatre formes de communication entre les élèves et l'enseignant (Scott, 2008). Le discours en classe peut être décomposé en épisodes, chacun étant caractérisé comme étant d'une part interactif ou non interactif et d'autre part dialogique ou *autoritatif* (Tableau 2).

Tableau 2: catégorisation des approches communicatives en classe selon Scott (2008)

	Interactif	Non interactif
Dialogique	L'enseignant et les élèves considèrent un ensemble d'idées	L'enseignant fait une revue d'un ensemble d'idées
Autoritatif	L'enseignant focalise sur un point de vue et conduit les élèves, par un jeu de questions-réponses, à construire et consolider ce point de vue	L'enseignant présente un point de vue spécifique

En plus de ces deux dimensions, Scott, Mortimer et al. (2006) précisent que lorsque le discours est dialogique, le niveau d'interanimation des idées peut être soit élevé, soit faible. Il est faible lorsque l'enseignant met à disposition de la classe différentes idées. Il est élevé lorsque ces différentes idées sont par exemple explorées, comparées, développées. Dans leurs travaux, ces auteurs ont cherché à étudier les nécessaires passages entre les différentes formes de discours au fil d'une leçon, cherchant ainsi à mettre en évidence une éventuelle chorégraphie ou des régularités d'un rythme discursif des interactions en classe. Cela les a amené à définir les éléments clés des discours dialogiques et *autoritatifs* dans la classe, tant du point de vue du rôle de l'enseignant que de celui des élèves. Le Tableau 3 présente ma traduction de ces éléments clés.

Tableau 3: éléments clés des discours dialogique et autoritatif selon Scott, Mortimer et al. (2006)

	Discours autoritatif	Discours dialogique
Définition	Focalisation sur un seul point de vue, habituellement celui de la science scolaire.	Ouverture à différents points de vue.
Éléments typiques	La direction est prescrite en avance Les contenus sont prédéterminés (limites) Pas d'interanimation des idées. Plusieurs points de vue peuvent être représentés, mais le discours est focalisé sur seulement l'un d'entre eux.	La direction change avec l'introduction et l'exploration des idées. Il n'y a pas de limites de contenus Interanimation variable (faible ou élevée) des idées Il y a plus d'un point de vue représenté et considéré.
Rôle de l'enseignant	L'autorité de l'enseignant concernant le sujet est claire L'enseignant prescrit la direction du discours L'enseignant est le gardien des points de vue	L'enseignant prend une position neutre en évitant des commentaires évaluatifs Il y a une symétrie dans les interactions enseignant-élève
Interventions de	Ignorer ou rejeter les idées des élèves Reformuler les idées des élèves	Inviter les élèves à contribuer Chercher à obtenir des clarifications et à

L'enseignant	Poser des questions directives Vérifier et corriger Contraindre la direction du discours pour éviter la dispersion	poursuivre des élaborations Poser de véritables questions Sonder la compréhension des élèves Comparer et faire apparaître les contrastes entre les différentes perspectives Encourager les élèves à initier des idées
Exigences pour les élèves	Suivre les directions et les indices fournis par l'enseignant Pratiquer la langue de la science scolaire en suivant l'enseignant Accepter le point de vue de la science scolaire	Présenter leur point de vue personnel Ecouter les autres élèves et l'enseignant Donner du sens aux réponses des autres Renforcer et appliquer de nouvelles idées en discutant avec les autres

La mise en tension de ces deux formes de discours met en évidence la place tenue par les idées des élèves et de l'enseignant au fil de la leçon, et structure les activités en épisodes, liés à des formats de communication spécifiques, au sein desquels les connaissances des élèves n'ont pas le même statut. Par exemple, dans toutes les activités développées au collège, une première phase de discussion collective permet à chacun de proposer une réponse, toutes les réponses étant à ce moment, légitimes. Dans une deuxième phase, un débat est organisé afin d'élaborer une réponse pour la classe : les points de vue sont confrontés les uns aux autres, et la réponse faisant consensus est sélectionnée, sans être encore reformulée. Ces deux premières phases sont dialogiques, même si la deuxième introduit une dernière phase *authoritative*, celle de l'institutionnalisation au cours de laquelle l'enseignant reformule la réponse de la classe pour établir un bilan formulé dans des termes compatibles avec le savoir scientifique scolaire.

Dans un souci de fonder les séquences d'enseignement sur des présupposés socio-constructivistes, le concept de *learning demand*³⁵ a été utilisé comme outil d'aide à la conception des séquences d'enseignement (Leach & Scott, 1995 ; 2002). Depuis la naissance, notre immersion dans une langue sociale, quotidienne nous outille pour communiquer avec autrui, façonne notre rapport au monde, en accordant une attention particulière à certains éléments plutôt qu'à d'autres. Par ailleurs, la langue scientifique scolaire n'est pas assimilable à la langue scientifique académique. Le concept de *learning demand* caractérise l'effort intellectuel que l'on demande aux élèves lorsqu'ils doivent comprendre un contenu scientifique. Il précise aussi en quoi l'explication scientifique d'un phénomène donné diffère du point de vue commun sur ce phénomène.

Selon Scott, Leach et al. (2006) cette *learning demand* est liée aux différences de fonctionnement des connaissances scientifiques et quotidiennes et des propriétés des concepts dans ces deux sphères.

- Concernant les ancrages épistémologiques des modèles explicatifs, « the ways of generating explanations using scientific models and theories that are taken for granted in school science, are not part of the everyday ways of talking and thinking of most learners » (Ibid, p. 64). Ainsi, si la science a l'objectif d'unifier les théories de manière à analyser une variété de situations, cela n'est pas le cas pour les explications construites dans la vie quotidienne³⁶.

³⁵ Dans la suite du texte, je conserverai l'expression « learning demand » dont la signification se rapproche de l'exigence à satisfaire pour apprendre.

³⁶ Les auteurs donnent l'exemple de l'énergie, qui est un concept central, unificateur en science, alors que dans la vie de tous les jours, le terme énergie fait référence à des significations différentes, et la possibilité de généraliser de ce qui est entendu par « énergie » n'est pas questionnée.

- Concernant l'ontologie des outils conceptuels mobilisés : « entities that are taken for granted as having a real existence in the realm of school science may not be similarly referred to in the everyday language of students » (Ibid., p. 64). Prenant l'exemple du cycle de la matière dans un écosystème, il s'avère que les élèves n'envisagent pas le gaz atmosphérique comme ressource possible, du fait que le gaz n'est pas pour eux une substance. Inversement, si l'énergie est étudiée comme une entité abstraite en science, elle est souvent envisagée comme une substance par les élèves.

Il est donc essentiel d'estimer les différences entre la langue scientifique scolaire et la langue sociale que les élèves maîtrisent et importent dans la classe de science. Il est également utile de prendre appui sur l'ensemble des travaux (sur les conceptions, les modes de raisonnement) qui ont été conduits depuis l'origine de la didactique des sciences. En comparant avec les objectifs d'enseignement que l'on souhaite atteindre, il est possible de définir la *learning demand*. Ainsi, lorsque il y a peu de recouvrement des points de vue scientifique et quotidien pour un concept, sa signification, ses propriétés, alors son apprentissage mais aussi son enseignement seront difficiles. Si le recouvrement est important, alors la *learning demand* sera plus faible, et les élèves pourront penser que les explications scientifiques à fournir à l'école sont faciles. Par exemple, pour l'énergie, la *learning demand* est importante, car si l'énergie augmente ou diminue dans la vie quotidienne, elle se conserve d'un point de vue scientifique. En mettant l'accent sur ces différences, les séquences conçues se concentrent sur les défis intellectuels auxquels les élèves vont être confrontés.

Au cours des projets collaboratifs DBR, les enseignants ont souhaité davantage de guidage concernant les moments au cours desquels les interactions sociales sont pertinentes. Par conséquent, les séquences d'enseignement développées intègrent des préconisations concernant les modalités de communication, tant entre élèves (rédaction de comptes rendus communs à un groupe, phases de débat pour discuter les choix opérés tant du point de vue des expérimentations que des interprétations en découlant), qu'entre l'enseignant et les élèves (attention portée au sens construit par les élèves à la situation et aux consignes, négociation orale et collective des termes utilisés avant la rédaction d'un bilan écrit des activités).

4.4 La physique

Les résultats de recherche liés à la modélisation et aux registres sémiotiques sont au cœur de mon cadre de conception et d'analyse. Je les présente ici succinctement car ils feront l'objet d'une présentation détaillée au chapitre 4.

4.4.1 Modélisation

Les recherches sur la modélisation en didactique des sciences considèrent celle-ci soit comme un outil de conception de séquences d'enseignement (Gaidioz & al., 2004) et de catégorisation les activités des élèves en phase d'élaboration de connaissances (Tiberghien, 1994), soit comme un outil précisant les contraintes d'un projet d'enseignement de la modélisation en science (Martinand, 1992). Comme indiqué en introduction de cette note de synthèse, mon travail sur l'activité des élèves se situe dans la lignée de ceux initiés par Andrée Tiberghien. Le postulat épistémo-psychologique sous-jacent à mes travaux est que, pour comprendre la physique, il est essentiel que les élèves parviennent à mettre en relation les objets, les phénomènes, et les modèles et théories pour expliquer ou prédire ces phénomènes. Il s'appuie sur une analyse de la physique et du travail du physicien « *when physicists interpret and predict experimental facts they do not directly apply a theory to the situation but, by using the chosen theory, they construct a model of the experimental situations [...] in this perspective, we consider that, in physics, interpretation*

and prediction imply a modeling process (Tiberghien, 1994, p. 73-74). Ce positionnement prend sa source dans les travaux de Suzanne Bachelard qui considère que le modèle en science « *représente non pas les propriétés du réel, mais seulement certaines propriétés. Il a une fonction sélective des données ou pseudo-données de l'expérience ; il sépare le pertinent du non-pertinent par rapport à la problématique considérée* » (Bachelard, 1979, p. 9). Partant du fait que les élèves apprennent la physique en assimilant les modes d'élaboration des connaissances scientifiques, Tiberghien (1994) fait alors les hypothèses suivantes : « *when s/he is interpreting (or predicting) a material situation s/he constructs a « model » of the situation (which could be analogical and/or propositional) and which depends on his/her own point of view. This implies that, like in physics, s/he selects the objects and events, which are relevant according to his/her point of view. Underlying such an hypothesis it is assumed that the learner is coherent from his/her point of view with respect to the situation which includes the social context* » (ibid., p. 75). L'obligation d'articuler les champs empiriques et théoriques guide la conception et l'analyse des séquences d'enseignement (quelles opérations liées à la modélisation sont proposées, mises en œuvre), donnant à voir la cohérence des activités vis-à-vis du fonctionnement de la physique, ainsi que la variété des instruments conceptuels auxquels les élèves peuvent avoir recours sans être contraints par des analyses focalisées sur l'adéquation aux seuls savoirs physiques.

4.4.2 Registres sémiotiques

Tous les modèles de la physique, scientifiques ou scolaires, s'appuient sur des représentations. Dans la continuité des travaux de Duval en mathématiques (1995), mes recherches en didactique de la physique postulent que les élèves donnent du sens aux modèles en s'appropriant et en articulant les divers registres de représentations des concepts. Dans le cas des sciences physiques, les registres les plus fréquents sont la langue naturelle, les graphes, les schémas, les tableaux, les relations algébriques et numériques. Chacun d'eux obéit à des règles spécifiques. Ainsi, l'apprentissage se joue à deux niveaux : tout d'abord au niveau de chacun des registres disponibles, puis dans l'articulation de ces registres. Lorsqu'un élève est confronté à ces registres, il peut soit le traiter de manière quasi-instantanée, lorsqu'il est suffisamment familier (c'est le cas, le plus souvent, de la langue naturelle, même si dans ce cas, il est possible que l'élève fasse référence à des connaissances communes et donc attribue un sens au concept qui ne soit pas conforme à sa signification scientifique) soit le traiter de manière intentionnelle lorsque l'élève reconnaît un registre pertinent à mettre en œuvre et le mobilise dans un but précis. Chaque registre obéissant à des règles différentes, le contenu porté par chacun d'entre eux n'est pas équivalent, la « *propriété fondamentale des représentations sémiotiques : leur transformabilité en d'autres représentations qui conservent soit tout le contenu de la représentation initiale soit une partie seulement de ce contenu* » (Duval, 1995, p. 36). Pour Duval, la compréhension d'un concept est « *liée à la découverte d'une invariance entre des représentations sémiotiquement hétérogène* » (ibid., p. 61).

La mobilisation des aspects sémiotiques dans les séquences développées, et les analyses qui en seront faites, ont conduit à proposer aux élèves des activités permettant à la fois de construire du sens à chacune des représentations mises en œuvre, et d'articuler ces représentations afin de les aider percevoir les intérêts et limites de chacune d'entre elles.

4.4.3 Rapport à l'expérimental

La réalisation des travaux pratiques n'a jamais été remise en question depuis leur introduction officielle en classe de physique en 1902. Si leur statut dans la construction des connaissances scolaires et donc leur place par rapport aux contenus théoriques a évolué, les expériences en classe de physique font

rarement l'objet d'une substitution au profit d'autres activités, comme la simulation. Font exception à cette règle : les expériences dangereuses, coûteuses, ou trop longues à réaliser³⁷.

Afin de cerner les critères de choix des enseignants sur les activités expérimentales à proposer aux élèves, je me suis appuyée sur une recherche préalable concernant les critères de stabilité d'une expérience en classe. Cette étude éclaire le choix des situations à intégrer aux séances conçues (Bécu-Robinault & Tiberghien, 1998[2]). Parmi les critères que j'ai retenus pour les expériences à présenter dans l'enseignement secondaire :

- les expériences doivent montrer des phénomènes perceptibles et éviter de comporter des boîtes noires cachant les processus expliquant les phénomènes observés ;
- les interprétations doivent être faites directement sur la base des concepts acquis en vue de l'élaboration ou de l'introduction d'un nouveau concept, relation : les interprétations ne doivent pas faire appel à des concepts intermédiaires (concepts qui ne sont pas ceux directement visés par la situation) ;
- la relation entre le traitement mathématique et les observations doit être la plus directe possible. Il s'agit d'éviter des traitements mathématiques compliquant la mise en relation des données mathématiques en vue de l'élaboration d'une relation entre grandeurs.

L'ensemble de ces critères va dans le sens d'une simplicité des expériences à réaliser avec les élèves. Un autre critère concerne la flexibilité de la place de l'expérience par rapport au reste de la leçon : il est important que l'expérience choisie puisse occuper différentes fonctions, selon les nécessités liées aux choix individuels de l'enseignant, aux restructurations des programmes...

5 Synthèse : les cadres didactiques pour la conception

La Figure 12 précise, sur la base des éléments présentés au fil de ce chapitre, la phase de conception du processus des projets collaboratifs DBR dont j'avais schématisé au préalable les grandes lignes en Figure 8, p. 27. Ces éléments sont représentés en fonction des ressources et contextes considérés : la recherche, le terrain, l'institution dans laquelle les séances devaient être implémentées.

Cette représentation itérative du processus de conception, d'implémentation et d'analyse marque le double enjeu praxéologique et heuristique des projets que j'ai animés, les séquences étant modifiées pour être utilisées par les praticiens, et les améliorations apportées interrogeant régulièrement les dimensions théoriques mobilisées pour la conception. Une partie des cadres didactiques a plus particulièrement été mobilisée lors de mes analyses : il s'agit de la modélisation et des registres sémiotiques. La manière dont ces composantes ont été mobilisées et combinées pour analyser les pratiques d'étude et d'enseignement est précisée dans le chapitre suivant.

³⁷ J'ai noté par ailleurs que, contrairement aux enseignants de SVT, les professeurs de physique avaient plus rarement recours aux simulations informatiques. L'objet de la physique étant d'établir des relations entre monde réel et monde des théories, ces outils apparaissent comme des mondes intermédiaires nécessitant une maîtrise préalable des deux autres (Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006, voir Tome 2, p. 54).

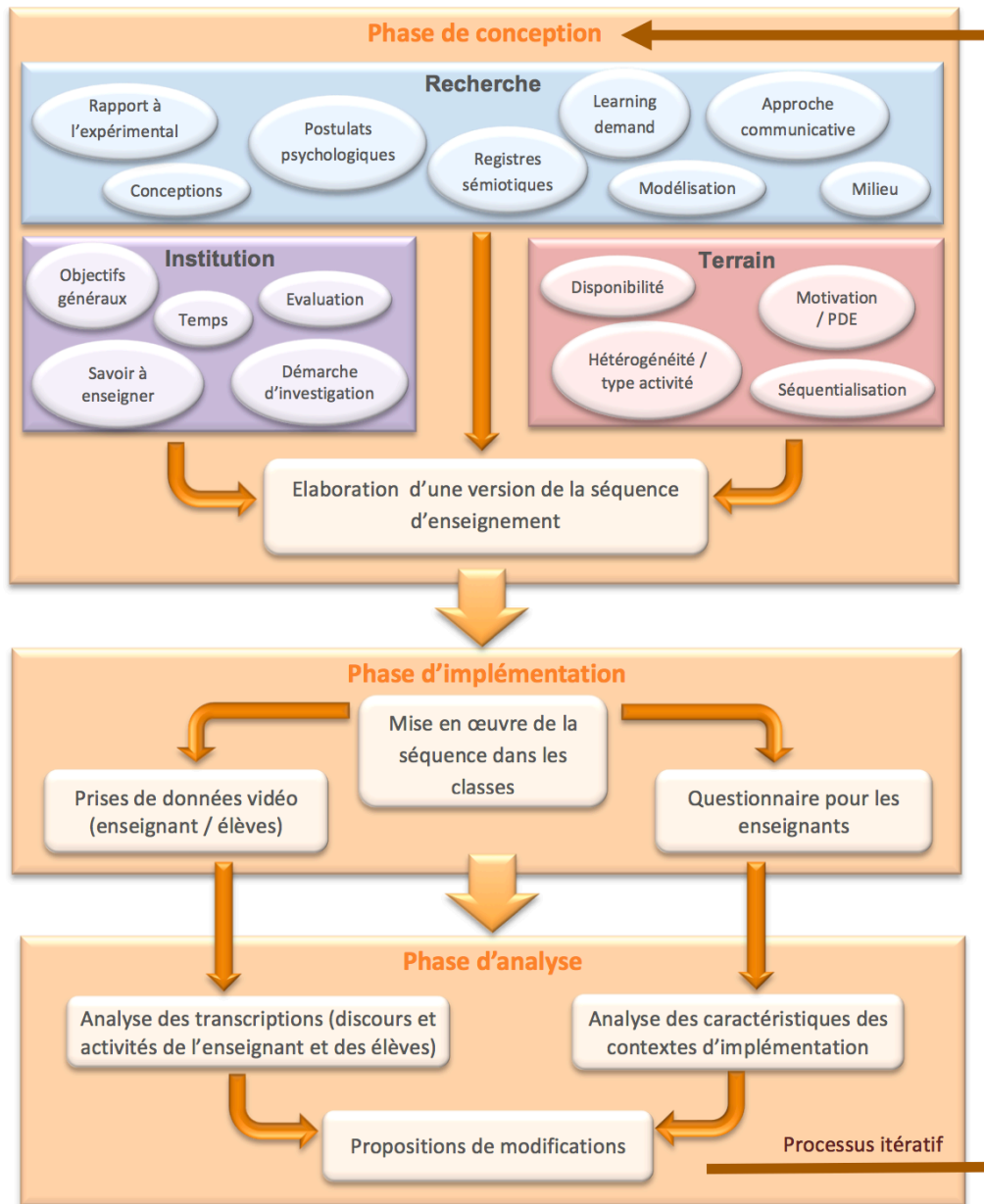


Figure 12: processus de conception dans les groupes collaboratifs DBR

Dans cette figure, au niveau de la phase de conception, le chercheur a été en charge des éléments relatifs aux dimensions théoriques mobilisées, à savoir dans ce cas : les conceptions des élèves, les postulats psychologiques, la modélisation, les registres sémiotiques, le rapport à l'expérimental, le milieu, la *learning demand*, et l'approche communicative. Les enseignants, du fait de leur connaissance du contexte, apportaient les éléments pour discuter de la faisabilité des activités, au regard de la composition des classes, de l'intérêt des élèves, des types d'activités possibles et de leur organisation temporelle, ainsi que de la disponibilité du matériel. Le programme officiel était un guide à la fois par les enseignants (les jeunes enseignants se sentant particulièrement contraints par ces injonctions) et par les chercheurs.

Le regard porté, sur ces documents étaient différent pour les deux types d'acteurs : pour les chercheurs, il s'agissait de reconstruire un enchaînement de séances aidant les élèves à s'engager dans les activités en ayant à disposition toutes les connaissances nécessaires à leur compréhension. Pour les enseignants, il s'agissait davantage de se donner un moyen objectif de trier, parmi les propositions

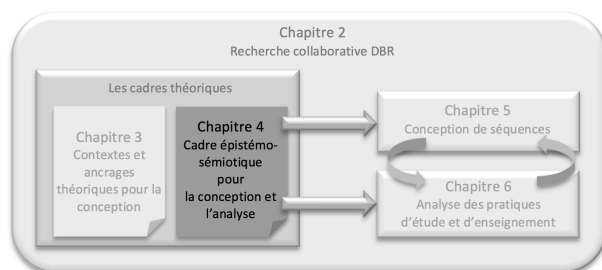
faites par les chercheurs, les contenus à présenter impérativement, et ceux qui étaient hors programme.

Au fil des projets collaboratifs DBR, les limites des domaines d'expertise des uns et des autres ont évolué : les enseignants ont pris position par rapport à des concepts de la didactique, et les chercheurs ont intégré les contraintes et les possibilités du contexte. Les dimensions théoriques mobilisées ont donc été assimilées, transformées par les enseignants, pour être intégrées aux documents élaborés, mais aussi aux interactions avec leurs élèves, dans la classe. Ces dimensions ont ainsi vu leur domaine d'application s'étendre, de l'aide à l'étude, vers l'enseignement. Cette extension a été rendue visible de par la forme des projets collaboratifs et les objectifs de conceptions d'activités pour les élèves qui ont conduit à une évolution sensible des rôles et des connaissances des acteurs au sein de ces projets.

Toutes les données (vidéo, questionnaires) ont été collectées puis analysées par les chercheurs impliqués dans les projets collaboratifs DBR. Certaines de ces données ont également été analysées par des étudiants en master recherche ou en doctorat. Seules les analyses effectuées sur une durée courte (de l'ordre de quelques mois) ont été utilisées en soutien aux propositions de modifications des séquences conçues. Dans le chapitre suivant, je centrerai mon propos sur le cadre épistémologique, articulant modélisation et registres sémiotiques, qui a été mobilisé à la fois pour la conception et l'analyse des séquences d'enseignement.

- Chapitre 4 -

Le cadre épistémo-sémiotique



Dans cette partie, j'expose dans un premier temps les origines des deux composantes du cadre épistémo-sémiotique : la modélisation et les registres de représentation. Ces deux composantes trouvent leur origine pour l'une dans l'épistémologie de la physique et pour l'autre dans la sémiotique et la psychologie cognitive. Ces composantes théoriques ont été combinées pour concevoir des séquences d'enseignement au sein des groupes collaboratifs DBR, et pour analyser les pratiques d'étude et d'enseignement. Je précise, en dernière partie de ce chapitre, les éléments de ces deux composantes et précise leur articulation au sein du cadre épistémo-sémiotique.

1 Introduction

Le fait de présenter le cadre épistémo-sémiotique séparément des autres composantes de mon cadre de conception et d'analyse ne signifie pas qu'il n'entretient pas de relations avec ces autres composantes. J'ai souhaité le présenter de manière détaillée au sein de ce chapitre en retraçant son historique ainsi que la manière dont la recherche en didactique s'empare habituellement de ces composantes que sont la modélisation et les représentations sémiotique et multimodales.

Ce cadre est né au cours de mon doctorat, pour analyser l'activité des élèves lorsqu'ils tentent d'expliquer ou de prédire des phénomènes énergétiques en mobilisant le modèle énergétique et sa représentation en chaînes. Les fondements et la portée des activités de modélisation des élèves venaient alors tout juste d'être publiée par Andrée Tiberghien dans son article aujourd'hui incontournable : *Modeling as a basis for understanding teaching-learning situations* (Tiberghien, 1994). Une analyse des éléments mis à disposition des élèves pour représenter les transferts et transformations d'énergie, les mesures effectuées, les relations entre grandeurs nécessaires pour introduire le concept de puissance a mis au jour l'obligation de considérer la diversité des signes pour représenter les éléments du modèle et la non équivalence entre ces différents signes. Les recherches poursuivies au collège n'ont fait que renforcer ces résultats, avec la distinction entre le dessin et le schéma, préalable à l'acceptation des normes de schématisation d'un circuit électrique par exemple. La généralisation des prises de données vidéo a également contribué à révéler l'impact des gestes produits par l'enseignant et les élèves, et les significations portées par ces modalités de communication.

Au fil de mes recherches, les analyses ont indiqué que les modèles enseignés, les activités de modélisation des élèves et de l'enseignant ne pouvaient être envisagées sans les systèmes de signes associés. La modélisation relevant d'un point de vue épistémologique sur le fonctionnement de la physique, et les registres sémiotiques étant les supports fondamentaux mobilisés pour communiquer les concepts et les modèles en jeu, la désignation de ce cadre comme *épistémo-sémiotique* apparaît aujourd'hui comme la plus adéquate.

Dans les parties suivantes, je présenterai les fondements des deux composantes de ce cadre, la modélisation et les représentations sémiotiques associées aux tâches de modélisation.

2 La modélisation

L'objectif de cette partie est double : il s'agit à la fois de présenter la place des modèles et de la modélisation dans les recherches en didactique, et de préciser comment cette composante *modélisation* de mon cadre épistémo-sémiotique s'est imposée comme centrale pour analyser les processus d'étude et d'enseignement et pour aider à la conception de situations d'enseignement. Pour traiter de la modélisation, il semble indispensable de positionner le point de vue adopté sur les modèles : enseignant, étudiant, chercheur, expert (Ney, 2007). Mon inscription dans le champ de la didactique donne aux savoirs disciplinaires une place centrale. Dans mes recherches, j'étudie la relation d'enseignement-apprentissage, en m'appuyant sur le fonctionnement des savoirs enseignés, notamment à travers les programmes officiels, et sur le rôle des connaissances préalables des élèves. Le fonctionnement des savoirs enseignés ne peut être étudié indépendamment des savoirs scientifiques. Cela me conduit, après un exposé de la place des modèles et de la modélisation dans les programmes, à présenter le point de vue de l'épistémologie sur ces mêmes objets. Je terminerai par une présentation des modèles et de la modélisation dans la recherche en didactique de la physique.

2.1 Les modèles et la modélisation dans les programmes

Le choix d'intégrer la modélisation et l'utilisation des modèles dans les séquences d'enseignement relève à la fois de l'importance accordée par la recherche aux modèles mais aussi de la place des modèles dans l'enseignement des sciences physiques.

2.1.1 Les modèles et la modélisation au lycée

Les modèles et la modélisation sont présentés depuis les programmes du lycée de 2001 comme un enjeu majeur de la formation scientifique. Ainsi trouve-t-on dans l'annexe de ces programmes : « *La logique pédagogique que sous-tendent ces nouvelles approches est que le développement des sciences se fait par un va-et-vient entre l'observation et l'expérience d'un côté, la conceptualisation et la modélisation de l'autre, et que l'exposé axiomatique de la science déjà faite ne correspond pas au mouvement de la science en train de se faire. L'exercice de modélisation du réel est sans doute la démarche la plus importante et aussi la plus difficile dans la démarche scientifique. Passer du concret à l'abstrait, de l'observation à sa traduction formalisée demande que l'on soit capable d'extraire du monde réel une représentation simplifiée, le degré de simplification dépendant du niveau où l'on se situe. La modélisation fait appel à des langages symboliques qui, suivant les cas, peuvent être des diagrammes, des schémas ou des expressions mathématiques. Le professeur doit s'efforcer sur des exemples simples de montrer comment se fait la modélisation, ceci dans toutes les sciences.* » (B.O. Hors-Série n°2 du 30 août 2001). L'importance de la modélisation est ici liée à la nécessité de faire concorder la science en train de se faire (avec ici une généralisation à toutes les sciences, même si dans la suite du texte, il est bien précisé qu'il s'agit d'une spécificité des sciences expérimentales) et les stratégies pédagogiques adoptées. Les législateurs reconnaissent la difficulté de l'exercice de modélisation, la nécessité du recours à des représentations symboliques variées, pour la mise en relation des grandeurs.

Dans le même esprit, en 2010, le préambule aux programmes du cycle terminal de la série scientifique au lycée indique que « la science est un mode de pensée qui s'attache à comprendre et décrire la réalité du monde à l'aide de lois toujours plus universelles et efficaces, par allers et retours inductifs et déductifs entre modélisation théorique et vérification expérimentale. Contrairement à la pensée dogmatique, la science n'est pas faite de vérités révélées intangibles, mais de questionnements, de recherches et de réponses qui évoluent et s'enrichissent avec le temps. Initier l'élève à la démarche scientifique, c'est lui permettre d'acquérir des compétences [...] autour des trois grandes étapes que

sont l'observation, la modélisation et l'action qui le rendent capable de mettre en œuvre un raisonnement pour identifier un problème, formuler des hypothèses, les confronter aux constats expérimentaux et exercer son esprit critique ». La modélisation est ici intégrée à la démarche scientifique, dans la continuité des injonctions au primaire et au collège sur la démarche d'investigation. Ces programmes prennent toutefois une certaine distance avec cette démarche d'investigation (d'ailleurs immédiatement renommée approche expérimentale), décrite comme étant « d'essence pédagogique », en précisant que les démarches scientifiques peuvent être variées.

Ces programmes consécutifs s'appuient sur l'articulation entre les tâches relatives à l'expérimentation et le recours aux concepts, lois, rendant compte des observations réalisées. Toutefois, une différence existe entre ces deux injonctions. En 2001, la modélisation est à sens unique : du concret vers l'abstrait, de la complexité du réel vers la représentation simplifiée de cette réalité. En 2010, il s'agit d'un processus cyclique, la modélisation étant située systématiquement entre l'observation et l'action sur le réel, dans des processus de vérification expérimentale (agir) et de modélisation théorique (observer et déduire). C'est dans ce passage du concret vers l'abstrait que la modélisation est explicitée, liée à un processus inductif, comme dans les programmes précédents. Dans ces programmes, la modélisation est bien constitutive de l'élaboration des connaissances scientifiques. Pour autant, sa justification reste ambiguë, car elle n'établit pas de distinction entre la construction des savoirs publiés par la communauté scientifique, et la construction des connaissances par les élèves.

2.1.2 Les modèles au collège

Mis à part les indications sur la modélisation des molécules, le terme de modélisation est quasiment absent des programmes de collège de 2008. Le terme modèle est utilisé, dans la partie introductive, une fois en lien avec les mathématiques, une autre fois avec les simulation, et dans la description des programmes, comme synonyme de représentation simplifiée de l'œil : « *Présenter les éléments de l'œil sous une forme appropriée : modèle élémentaire* » (B.O., 2008, p. 21). Si les termes sont moins présents dans les textes du collège que dans ceux du lycée, les objectifs et les activités proposées impliquent toutefois l'enseignement et la manipulation des modèles en optique et en électricité. Tout comme les programmes du lycée, la prise en charge de l'enseignement des modèles et de la modélisation ne relève pas que de la seule responsabilité du professeur de physique. Le seul exemple donné dans les préambules concernant l'utilisation d'un modèle au collège est relatif à l'infiniment petit.

- « un modèle peut fournir une certaine représentation de la réalité »
- « L'observation et l'expérience révèlent progressivement d'autres échelles d'organisation, celles des cellules, des molécules, des ions et des atomes, chaque niveau possédant ses règles d'organisation, et pouvant être également représenté par des modèles » ;
- « Les simulations numériques sont l'occasion d'une réflexion systématique sur les modèles qui les sous-tendent, sur leurs limites, sur la distinction nécessaire entre réel et virtuel » ;
- « Les connaissances acquises en mathématiques permettent de s'appuyer sur des modèles de représentation issus de la géométrie »
- « les mathématiques aident à structurer la pensée et fournissent des modèles et des outils aux autres disciplines scientifiques et à la technologie ». (B.O. spécial n° 6 du 28 août 2008)

Pour autant, divers modèles sont proposés: les grandeurs et lois en électricité, modèle de l'œil et modèle du rayon lumineux³⁸. L'enseignement des sciences physique au collège serait donc davantage tourné vers l'enseignement des modèles, alors que celui du lycée serait plutôt orienté vers les tâches de modélisation.

L'absence des activités de modélisation dans les programmes du collège, pourtant centrales au lycée conduit à questionner la différence qui est faite entre modèles et modélisation. Bien sûr, ces termes appartiennent aussi au langage commun et sont donc porteur d'une signification qui peut interférer, en particulier pour les élèves, avec leur signification scientifique. Avant de préciser le point de vue épistémologique, je présente le sens commun de ces termes.

2.2 Modèles et modélisation : le sens commun

La définition donnée par le TLF au modèle est une « chose ou personne qui, grâce à ses caractéristiques, à ses qualités, peut servir de référence à l'imitation ou à la reproduction ». Cette signification, renvoyant à ce qui doit être imité ou ce qui constitue l'exemple type, justifie l'emploi de ce terme dans des expressions telles que servir de modèle, prendre modèle sur, etc. Le sens relatif aux sciences, différent de la simple reproduction simplifiée, n'émerge qu'à la fin du 19^{ème} siècle (Varenes, 2008) avec des expressions comme le modèle explicatif, le modèle logico-mathématique : « on parle de modèle, en science, chaque fois qu'il y a renvoi d'une réalité concrète à une réalité idéale avec exploitation de leurs analogies descriptives. Analogie ne signifie nullement identité; il existe même une différence de nature entre le modèle et le réel qu'il représente, le modèle ayant une valeur symbolique » (TLF). Au sens quotidien, cette prégnance du modèle comme idéal, exemple parfait difficile à copier ou qui ne peut être critiqué ou remis en cause tend à lui donner des propriétés qu'il n'a pas en sciences.

La modélisation est quant à elle définie comme l'« opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin d'étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de tel ou tel de ses éléments composants » (TLF). Ainsi, si le modèle fait référence à l'objet, la modélisation est le processus par lequel on construit le modèle.

Cette analyse lexicologique des modèles souligne des difficultés potentielles pour les élèves et les enseignants à s'appropriier ces termes dans le cadre des sciences physiques. Pour l'un comme l'autre, un modèle serait un objet difficile à construire, et la modélisation, en tant que processus, est difficilement enseignable sans connaître l'objet qui doit être modélisé. A la lueur de cette analyse, le modèle scientifique souffrirait de l'héritage de son sens commun et nécessiterait d'être redéfini dans ce qu'il a de spécifique aux sciences physiques.

2.3 Modèles et modélisation dans l'épistémologie de la physique

Avant d'envisager le positionnement de la didactique de la physique et compte tenu de l'ambiguïté relevée dans les programmes officiels sur les références justifiant de l'importance des modèles et de la modélisation, il est utile de spécifier la place attribuée par la communauté des physiciens à ces objets et à cette activité dans la construction des connaissances scientifiques.

³⁸ Je reprends ici l'expression utilisée dans les programmes, même s'il serait plus approprié de l'intituler « modèle du rayon de lumière ».

2.3.1 Définitions du modèle - caractérisation

Les modèles et les démarches de modélisation jouent sans conteste un rôle primordial dans le développement des connaissances scientifiques. Pourtant, « *parler du concept de modèle et tenter de dégager quelques points saillants d'une histoire, même lacunaire et limitée, de ce concept est une entreprise périlleuse, étant donné le spectre très large de ses significations qui va des formalismes mathématiques aux maquettes et moulages* » (Bachelard, 1979, p. 3). Je définirai donc pas ici précisément ce qu'est ou n'est pas un modèle, mais je donnerai des pistes pour préciser la nature des modèles construits, mobilisés par les physiciens, en relation avec d'autres outils habituellement mis en œuvre.

La définition donnée par Walliser (1977), englobe une variété de modèles en physique, qui seront ensuite catégorisés : « *dans sa définition la plus large, la notion de modèle recouvre toute représentation d'un système réel, qu'elle soit mentale ou physique, exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique* » (Ibid, p. 116). Cette définition se rapproche de celle de Minsky : « *To an observer B, an object A* is a model of an object A to the extent that B can use A* to answer questions that interest him about A* » (Minsky, 1965, p. 46). Cette première définition générale n'explicite pas la relation entre le modèle et les concepts scientifiques. Cela tient à son approche généraliste, le modèle étant une représentation d'un système réel, avec lequel il entretient des relations d'isomorphisme. Walliser précise dans la suite de son ouvrage, les relations avec les concepts, les théories.

Dans une approche psycho-sociologisante opposant la forme de pensée des scientifiques Anglais et Français, Duhem³⁹, remet en cause le statut scientifique du modèle, en le positionnant comme un sous-produit figuratif, provisoire, grossier et éloigné des théories. Les modèles élaborés par les anglais ne viseraient qu'à créer une image concrète : « *Tandis que, pour le physicien français ou allemand, la partie algébrique d'une théorie est destinée à remplacer exactement la suite de syllogismes par laquelle cette théorie se développerait, pour le physicien anglais, elle tient lieu de modèle ; elle est agencement de signes, saisissables à l'imagination, dont le jeu, conduit selon les règles de l'Algèbre, imite plus ou moins fidèlement les lois des phénomènes qu'on veut étudier [...]. Lorsque au contraire W. Thomson propose un modèle mécanique d'un ensemble de phénomènes, il ne s'impose pas des raisonnements bien minutieux pour établir un rapprochement entre cet agencement de corps concrets et les lois physiques qu'il est appelé à représenter* » (Duhem, 1981, p. 115). Pour Duhem, l'articulation entre les outils mathématiques et les objets concrets ou figurés nuit à la précision et à la cohérence des idées : « *l'esprit anglais est nettement caractérisé par l'ampleur de la faculté qui sert à imaginer les ensembles concrets et par la faiblesse de la faculté qui abstrait et généralise. Cette forme particulière d'esprit engendre une forme particulière de théorie physique ; les lois d'un même groupe ne sont point coordonnées en un système logique ; elles sont figurées par un modèle ; ce modèle peut être, d'ailleurs, soit un mécanisme construit avec des corps concrets, soit un agencement de signes algébriques ; en tout cas, la théorie anglaise, ne se soumet point, dans son développement, aux règles d'ordre et d'unité qu'impose la Logique.* » (Ibid, p. 126). On remarquera toutefois que la conception du modèle par Duhem est très étriquée, car il réfère exclusivement aux modèles mécaniques et à leur fonction figurative.

En opposition à l'approche duhémienne, qui tend à omettre la relation du modèle aux concepts et aux situations expérimentales, Bachelard (1979, p. 3) considère « *le modèle comme rapport d'une approche théorisante à la réalité [...] le modèle n'est jamais un objet pris pour soi. Il est toujours relationnel* ». Le modèle n'est

³⁹ Pierre Duhem (1861-1916) est un physicien, chimiste, historien et philosophe des sciences français. Suzanne Bachelard (1979) qualifie son épistémologie comme n'étant pas tout à fait contemporaine de la physique de son temps. Si son approche des esprits anglais (imaginatifs, amples mais faibles) et français ou allemands (abstraites, logiques) est caricaturale, elle est intéressante car elle met en évidence la difficulté à considérer comme valable les raisonnements en physique non fondés sur la logique mathématique : « *dans la construction d'une théorie physique, les Anglais n'attribuent pas toujours aux Mathématiques le même rôle que les savants continentaux* » (Duhem, 1981, p. 112).

donc jamais ni purement théorique, ni exclusivement concret, car « *le modèle dans son acceptation la plus abstraite, fonctionne d'une manière ostensive, et le modèle, dans son acceptation la plus concrète de modèle visualisable, laisse transparaître la dominante théorique* » (Ibid, p. 8). En complément à la définition de Walliser donnée plus haut, Bachelard précise ici la relation entretenue par le modèle aux concepts, aux lois. Il ne s'agit pas seulement de représenter la réalité, mais de la représenter à travers le filtre d'une théorie. C'est l'une des raisons pour lesquelles le modèle peut donner à voir, à celui qui a accès à la théorie, quels sont les éléments qui justifient le mode de fonctionnement de ce modèle.

Cette correspondance entre modèle et réalité est également donnée comme centrale dans la définition du modèle selon Halbwachs (1974, p. 39-40) : « *à toute situation physique du « monde réel », il correspondra, dans la « science physique », [...] un (ou plusieurs) systèmes de « signes » consistant en des figures, des graphiques, des symboles mathématiques, ou plus simplement des propositions formées avec des mots, systèmes qui seront alors censés représenter la situation. A un tel système de signes, nous donnerons le nom de modèle et nous poserons la définition : connaître une situation, c'est la représenter par un modèle* ». La fonction du modèle est de donner une explication du monde réel, et non une description, sur la base d'énoncés qui ne répondent pas nécessairement à des exigences d'isomorphisme (ce qui conduit à des modèles-images). Toutefois, les transformations théoriques effectuées dans le modèle et les transformations expérimentales opérant sur la situation se font en parallèle.

Quels que soient les propos des épistémologues sur l'utilité des modèles en science, ils les considèrent comme des constructions visant à rendre compte de phénomènes entretenant des relations avec les corps de savoirs déjà constitués ou en cours d'élaboration. Ces constructions relevant de choix opérés par leurs concepteurs, les modèles ne représentent jamais la totalité des phénomènes. Le modèle « *est un instrument d'intelligibilité d'un réel dont la complexité des propriétés ne permet pas l'entière compréhension par la science : disons de façon plus explicite qu'en physique par exemple, la modélisation, par la sélection des données, par la considération exclusive de certains paramètres, par la précision d'hypothèses simplificatrices, permet la mise en œuvre de la mathématisation. Le modèle, copie du réel, serait ou trivial dans la mesure où ce réel est dominé par la connaissance scientifique, ou chimérique dans la mesure où de l'inconnu ou du mal connu subsiste. Loin de fonctionner comme copie, le modèle fonctionne comme opérateur sélectif* » (Bachelard, 1979, p. 9). Cette opération de sélection, liée à la fonction de représentation du modèle, est partagée par Fourez & Englebert-Lecomte (1999, p. 7) « *les scientifiques ne se laissent pas immerger par le monde qui les entoure : ils opèrent des sélections pour se le représenter* ». Également en lien avec la fonction de sélection, Walliser (1977, p.123) précise « *qu'un modèle est une représentation simplifiée d'un système. Ceci suppose qu'on ait une représentation parfaite et complète du système* ». Ainsi, la simplification opérée par le choix des éléments à représenter n'est perceptible que par les personnes qui ont une vue d'ensemble de la situation étudiée. Cette simplification n'est pas triviale pour une personne n'ayant pas connaissance de la situation initiale soumise à l'investigation.

S'il est difficile de trouver une définition du modèle chez les différents auteurs que j'ai consultés, il faut également noter que ces derniers ne sont pas forcément toujours très cohérents dans les termes choisis pour présenter les modèles. Par exemple, Halbwachs utilise par moment les termes « théorie » ou « représentation » en lieu et place de « modèle ». Fourez (1997, p. 77) tente de préciser la distinction qu'il conviendrait d'établir entre l'abstraction et le modèle : « *on pourrait dire que « abstraction » ou « modèle » sont des termes équivalents. Cependant quand on parle de « abstraction » on veut insister sur la conscience que l'on a que le modèle utilisé n'est qu'une représentation du monde parmi d'autres possibles ; et que cette « abstraction » a été obtenue en ne tenant pas compte d'éléments jugés non pertinents dans le contexte et selon les projets que l'on avait* ». Ce même auteur dans un autre document donne une fonction similaire à différents processus : « *Modéliser, conceptualiser, se représenter, théoriser, trouver une loi d'un phénomène et abstraire sont un*

ensemble de termes qui parlent de la construction d'une image, d'un schéma, de phrases, de symboles, d'équations, etc., capables de tenir la place d'un réel complexe lors d'une discussion ou de la planification d'une action » (Fourez & Englebert-Lecomte, 1999, p.8). De manière générale, la littérature révèle des utilisations souvent indifférenciées des termes modèles et représentations, ou modèles et théories. Je reviendrai dans le paragraphe suivant sur les distinctions opérables entre ces deux concepts.

En conclusion, si la définition de ce qu'est un modèle (voire même de ce qui le distingue d'autres outils à disposition du scientifique) ne fait pas consensus dans la communauté des épistémologues, ses fonctions de représentation et de simplification de la réalité semblent reconnues : « *on tend à considérer actuellement – tant en sciences de la nature qu'en sciences humaines – qu'un modèle ou une théorie (au sens général du terme) désigne une représentation structurelle d'une partie de la réalité composée d'éléments placés en relation et qui met l'accent sur l'essentiel. Un modèle est donc par définition simplificateur d'une réalité, il ne la reproduit pas. Ce qui importe c'est sa portée heuristique* » (Verhaeghe & al., 2004, p. 47). Afin de préciser cette portée heuristique, il convient de considérer les différents types de modèles, et les liens qu'ils entretiennent entre eux.

2.3.2 Les différents modèles et leurs relations (et lien avec les théories)

Actuellement en physique, comme en mathématiques ou en sciences naturelles, humaines, le recours à un modèle est quasi-systématique pour aborder la complexité des situations étudiées. Parmi la multitude des modèles à disposition, ce recours nécessite un choix en fonction des objectifs poursuivis (Fourez, 1997). Ainsi, en reprenant un exemple donné par Halbwachs (1974) à propos de la lumière, on pourra avoir recours à un modèle corpusculaire, ondulatoire, géométrique, quantique, chacun de ces modèles favorisant l'étude des phénomènes sur la base de principes, de concepts, de lois et même de représentations spécifiques. Ces modèles sont tous valides, mêmes s'ils ne sont pas équivalents du fait de leurs domaines de validité spécifiques. Halbwachs décrit les relations existant entre ces modèles comme un emboîtement (Figure 13).

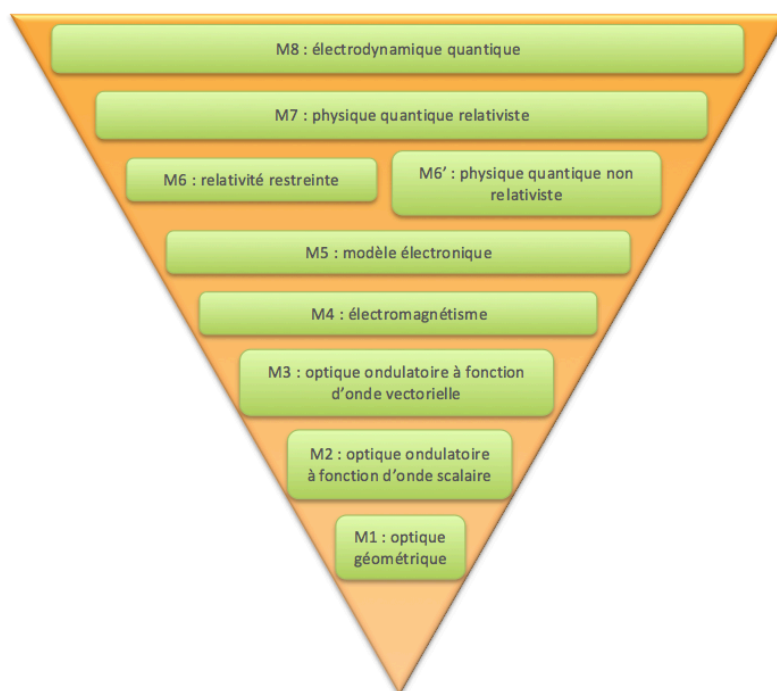


Figure 13 : emboîtement des modèles relatifs à la lumière selon Halbwachs (1974, p. 110)

A chaque modèle est associé un domaine de prévision de résultats expérimentaux. Ainsi, le modèle M1 de l'optique géométrique étudie le trajet rectiligne de la lumière, de la formation des images, alors que le modèle M2 de l'optique ondulatoire explique les interférences, les phénomènes de diffraction. « *Le modèle M1 apparaît comme un cas particulier, ou une première approximation du modèle M2. Celui-ci « rend compte » parfaitement de toutes les caractéristiques du modèle M1, mais en même temps, il permet de prévoir un grand nombre de phénomènes nouveaux qui n'étaient pas impliqués par M1. On dira que M1 est « emboîté » dans M2.* » (Ibid, p. 108). Cet emboîtement se poursuit jusqu'au modèle M8, reliant matière et lumière. Avant qu'un prochain modèle ne vienne le coiffer, ce niveau est la clef de voûte de l'édifice.

En apparence, cette idée d'emboîtement de modèles s'apparente à celle de Walliser pour qui « *un modèle M' est un modèle simplifié de M si l'ensemble de ses propriétés compatibles est inclus dans celui de M* » (Ibid, p. 123). Toutefois, la distinction entre les modèles empiriques et les modèles théoriques conduit Walliser à établir des rapports qui ne sont pas nécessairement qualifiés d'emboîtements. Tout d'abord, il distingue deux types de modèles :

- **les modèles physiques**, aussi dénommés maquettes, donnant à voir la situation sous une forme concrète qui peut être soit homothétique, comme cela peut être le cas pour les modèles réduits, soit analogique.
- **Les modèles symboliques**, qualifiés également de modèles isohyliques, qui ont pour caractéristique de représenter la situation à l'aide d'une langue plus ou moins abstraite (un schéma, un graphe, des tableaux).

Cette distinction ne doit pas laisser croire que tous les modèles rentrent sans ambiguïté dans l'une ou l'autre de ces catégories. En effet, « *tout modèle isohylique conserve un support matériel et toute maquette recourt à certaines abstractions* » (Ibid, p. 124). Une même situation peut être représentée par l'un ou l'autre (ou l'un et l'autre) de ces modèles, les correspondances termes à terme de ces deux modèles n'étant pas toujours possible, du fait de la difficulté à représenter symboliquement certaines propriétés accessibles à nos sens et inversement. Cette catégorisation laissant la porte ouverte à de possibles recouvrements est intéressante, car elle donne du sens par exemple à la « modélisation » pratiquée à l'école primaire en cycle 3 où les élèves doivent produire une modélisation permettant une explication, cette modélisation sous forme de maquette (désignée par Walliser comme modèle physique) sur les phases de la Lune. Je donnerai dans le chapitre 5 des exemples de tels modèles, conçus au sein des groupes collaboratifs DBR.

Les modèles symboliques sont de deux types :

- les modèles formels ne faisant appel qu'à des symboles dégageant les propriétés générales d'une situation (comme par exemple un graphe non valué pour prévoir un sens de variation ou loi générale s'appliquant au système)
- les modèles numériques attribuant des valeurs numériques aux paramètres considérés (par exemple un graphe valué ou des équations numériques pour le calcul d'une grandeur).

Cette typologie des modèles formels, associée à la définition de leur champ validité conduit Walliser à établir une hiérarchie, reposant sur une formulation plus ou moins universelle du modèle, « *telle que chaque modèle d'une strate soit un modèle empirique pour les modèles de la strate supérieur et un modèle théorique pour les modèles de la strate inférieure* » (Ibid, p. 151). Par exemple, sur la Figure 14, M2' sera un modèle empirique par rapport au modèles M1, M1', M1'' si M2 permet de retrouver les modèles M1, moyennant des hypothèses sur les situations auxquels ces derniers s'appliquent. M2' sera considéré comme modèle empirique au niveau du modèle M3.

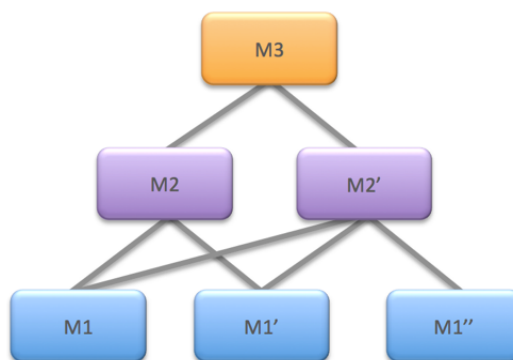


Figure 14: hiérarchie des modèles selon Walliser (1977, p. 151)

Il existe des similitudes entre la description de Walliser et celle de la hiérarchie entre la théorie et les lois de Duhem (1981). « Parmi les effets de la lumière, il n'en est qu'un fort petit nombre que les Anciens eussent réduits en lois ; les seules lois optiques qu'ils connussent étaient la loi de la propagation rectiligne de la lumière et les lois de réflexion ; ce maigre contingent s'accrut, à l'époque de Descartes, de la loi de réfraction. Une Optique aussi réduite pouvait se passer de théorie [...]. Comment, au contraire, le physicien qui veut étudier l'Optique actuelle pourrait-il, sans l'aide d'une théorie, acquérir une connaissance, même superficielle de ce domaine immense ? Effets de réfraction simple, de réfraction double par des cristaux uniaxes ou biaxes, de réflexion sur des milieux isotropes ou cristallisés [...] chacune de ces grandes catégories de phénomènes donne lieu à l'énoncé d'une foule de lois expérimentales dont le nombre, dont la complication, effrayeraient la mémoire la plus capable et la plus fidèle. La théorie optique survient ; elle s'empare de toutes ces lois et les condense en un petit nombre de principes ; de ces principes, on peut toujours, par un calcul régulier et sûr, tirer la loi dont on veut faire usage ; il n'est donc plus nécessaire de garder la connaissance de toutes ces lois ; la connaissance des principes sur lesquels repose la théorie suffit » (Duhem, 1981, p. 29). Outre l'importance toujours accordée aux outils mathématiques, il semble que la théorie ici décrite correspondrait au modèle théorique défini par Walliser⁴⁰. En reliant cette définition (dans la mesure où l'on accepte de mettre en relation ces points de vue très différents sur la place du modèle) avec les emboîtements de modèles proposés par Halbwachs, un modèle aurait une portée plus ou moins locale. Si cette portée tend à l'universalité des situations, le modèle acquiert le statut de théorie. La relation entre théorie et modèle est considérée différemment par Bunge (1973, p. 64) pour qui « un modèle n'appartient pas en propre à une théorie [...]. Un modèle donné peut toujours, moyennant certaines restrictions, être incorporé à un très grand nombre de théories ». Dans ce cas, les modèles n'entretiennent pas de relations hiérarchiques entre eux, mais sont suffisamment flexibles pour être mis en relation avec diverses théories.

La hiérarchie des modèles telle que définie par Walliser (1977) le conduit à envisager, différemment de Halbwachs, les rapports entre les modèles théoriques. Ainsi, des modèles théoriques peuvent être dans des rapports :

- **d'équivalence** : deux modèles théoriques sont considérés comme équivalents s'ils permettent de représenter les mêmes modèles empiriques. Par exemple, les modèles d'attraction entre corps par des forces ou des champs sont équivalents ;
- **d'emboîtement** : des modèles théoriques sont emboîtés si l'un d'entre eux représente un ensemble de modèles empiriques, que cet ensemble inclut l'ensemble de modèles empiriques du deuxième modèle théorique, et que ce deuxième modèle peut se déduire du premier. On dira

⁴⁰ Duhem (1981, p. 24) définit effectivement la théorie physique comme « un système de propositions mathématiques, déduites d'un petit nombre de principes, qui ont pour but de représenter, aussi simplement aussi complètement et aussi exactement que possible, un ensemble de lois expérimentales ».

par exemple que les modèles de la mécanique classique et de la relativité restreinte sont emboîtés, la mécanique classique étant une approximation de la relativité restreinte pour des vitesses faibles ;

- **de complémentarité** : si les modèles empiriques qu'ils représentent ne sont que partiellement communs, mais que les modèles théoriques ne sont pas logiquement antagonistes, alors les modèles théoriques sont complémentaires ; par exemple, pour Walliser, les modèles « *corpusculaires et ondulatoires de la lumière sont complémentaires* » (Ibid., p. 151) ;
- **de contradiction** : si les modèles empiriques qu'ils représentent ne sont que partiellement communs, et que les modèles théoriques sont logiquement incompatibles.

Cette typologie des modèles, et la précision des liens qui les relient les uns aux autres, éclaire les difficultés que les élèves rencontrent au fil de leur scolarité, quand ils se voient proposer des situations qui paraissent identiques, mais pour lesquelles les outils théoriques à mobiliser varient ; cela est le cas par exemple au collège quand on demande aux élèves de passer d'une interprétation concernant la taille et la vision des objets à une interprétation ondulatoire liée à la couleur de la lumière et des objets. Il ne s'agira pas tant de qualifier un modèle de plus ou moins vrai, mais davantage de préciser en quoi ce modèle est pertinent pour étudier des aspects choisis de la situation. Ce point nous amène à prendre en considération la manière dont s'articulent les modèles avec les situations expérimentales. Je me situerai donc davantage dans la hiérarchie proposée par Walliser que dans la représentation d'Halbwachs qui définit toutfois ce que peut être une théorie, à savoir le modèle emboitant l'ensemble des autres modèles.

2.3.3 Les modèles et le monde réel

Bunge (1983) pose comme fondamentale la distinction entre le réel, appelé aussi monde physique, et les concepts. La recherche de relations entre le monde physique et les concepts est au cœur de la démarche du physicien. Cette démarche qualifiée d'expérimentale, articulant les hypothèses et les épreuves expérimentales a été posée par Galilée (même si ce n'est pas lui qui l'a définie ainsi), et s'est diversifiée peu à peu. Avec le raffinement des théories, et le recours systématique à des formalismes mathématiques, les scientifiques sont devenus plus exigeants vis à vis des données empiriques, et plus tolérants vis à vis des théories. Il en reste que « *les hypothèses doivent s'enrichir de données pour pouvoir être testées, les théories doivent être enrichies de données et d'hypothèses* » (Ibid, p. 34). Du fait de son statut d'opérateur sélectif (Bachelard, 1979 ; Fourez & Englebert-Lecomte, 1999), le modèle se situe à la charnière entre les théories et les données empiriques ; le processus de modélisation étant lié à leur mise en relation.

Pour Walliser (1977), le modèle est un médiateur à l'articulation entre champ théorique et champ empirique. « Tout modèle M, à quelque niveau qu'il se situe, peut être considéré comme un médiateur entre un champ théorique dont il est une interprétation et un champ empirique dont il est une synthèse » (Ibid., p. 153). En relation avec la hiérarchie des modèles qu'il propose, le champ théorique est constitué de l'ensemble des modèles théoriques compatibles avec le modèle mobilisé et des principes logiques sous-jacents à ce modèle. Quant au champ empirique, il est composé de l'ensemble des modèles empiriques qu'il est possible de déduire du modèle considéré et des protocoles expérimentaux qui fondent le modèle. Cette posture intègre donc au champ théorique toutes les connaissances scientifiques précédemment validées, alors que le champ empirique comporte à la fois les objets, événements, et les connaissances qui sont en cours de construction. Les activités de modélisation sont relatives à l'interprétation ou à la validation (Figure 15).

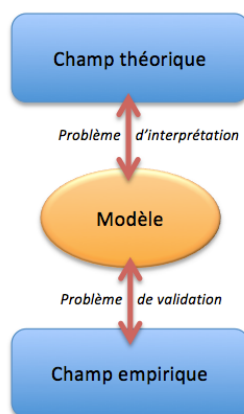


Figure 15: schéma de la modélisation selon Walliser (1977, p.154)

Le physicien élabore des connaissances sur les objets du monde réel, matériel, leur fonctionnement, les lois qui régissent leurs interactions, les phénomènes. Pour aller au-delà du simple domaine de la perception, il recourt à des formalismes (Hulin, 1992 ; Feynman, 1980). Même si les mathématiques occupent une place de choix au sein de ce domaine, Il n'est pas possible d'envisager de faire de la physique sur la seule base des formalismes, des théories précédemment élaborées. Même dans le cas de la physique dite fondamentale, le rapport aux objets étudiés est primordial, comme le stipule la page de présentation des activités du CERN : « *Le CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde. Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des constituants et des lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques très complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière : les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la Nature* »⁴¹. Pour interpréter, expliquer les situations étudiées dans ce monde réel, le physicien devra mettre en œuvre des connaissances de sa communauté comme les paradigmes (Kuhn, 1983), les lois, les principes fondamentaux. Ces connaissances forment les instruments théoriques qui donnent un sens du point de vue de la physique à ce qui aura été observé.

Les connaissances élaborées relèvent du niveau des théories et des modèles (Walliser, 1977 ; Halbwachs, 1974) et portent sur des objets et phénomènes relatifs au monde réel, qualifié par Walliser de champ empirique. La mise en relation de ces deux niveaux permet d'interpréter les phénomènes à partir des constructions théoriques de la physique, et de donner du sens aux formalismes à travers leur signification du point de vue des objets et événements. La construction, la création de nouvelles théories - modèles sont validées à travers cette relation permanente que le physicien doit conserver à l'esprit (Feynman, 1980).

2.4 Les modèles et la modélisation dans la recherche en didactique

Ces produits et processus que sont les modèles et la modélisation ont fait l'objet de nombreuses recherches et publications quant aux rôles qu'ils peuvent ou doivent jouer dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences. Avant de présenter comment je les ai mobilisés, je dessine un panorama des travaux mentionnant ces approches en précisant leur utilisation. Après cette présentation j'exposerai ma position dans le paysage de ces travaux en indiquant mes apports.

⁴¹ <http://home.web.cern.ch/fr> (page consultée le 25 Juin 2015)

2.4.1 Bref aperçu de la littérature française sur les modèles et la modélisation

Une exploration des titres des articles dans les quatre principales revues francophones publiant des recherches en didactique des sciences⁴² montre la place incontournable des modèles et de la modélisation. Le Tableau 4 présente les titres d'articles comportant des références explicites aux modèles ou aux activités de modélisation⁴³ dans le titre.

Tableau 4: liste des articles publiés dans les revues de didactique francophones (Aster, Didaskalia, Education et Didactique, RDST) dont le titre fait explicitement référence aux modèles ou à la modélisation.

Année	Titre	revue	Auteurs
1988	Le modèle en questions	ASTER	Drouin A.-M.
	Statut et rôle des modèles dans le travail scientifique et dans l'enseignement de la biologie	ASTER	Rumelhard G.
	Les modèles particuliers	ASTER	Genzling J.-C.
	Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième	ASTER	Chomat A., Larcher C., Méheut M.
	Modélisation et astronomie	ASTER	Pierrard M.-A.
	Circuits et modélisation	ASTER	Sarrazin L., Genzling J.-C.
	Gestion d'activités de modélisation en classe	ASTER	Lemeignan G., Weil-Barais A.
1989	Vers des activités didactiques de mise au point de modèles de physique avec des micro-ordinateurs	ASTER	Durey A., Journeaux R.
	Systèmes et modèles : quelques repères bibliographiques	ASTER	Host V.
1990	Les formulations successives du savoir : le concept de récepteur et le modèle clé-serrure	ASTER	Perez E.
1991	Construire des méthodes à l'école élémentaire : la séparation de variables et la modélisation	ASTER	Genzling J.-C.
1992	Guider le raisonnement d'élèves de collège avec des modèles particuliers de la matière	Aster	Séré M.-G.
1994	Les modèles des élèves sur la pression et leurs implications pour l'enseignement	Aster	Kariotogloulou P., Psillos, D.
	D'une représentation à une autre pour modéliser les transformations de la matière au collège	Aster	Larcher C., Chomat A., Lineatte C.
1995	Situations-problèmes et modélisation ; l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique	Didaskalia	Robardet G.
1996	Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège : <i>questionnement et simulation</i>	Didaskalia	Méheut M.
	Un modèle pour la compréhension des propriétés des liquides	Didaskalia	Borghi, L., De Ambrosis A., Invernizzi C., Mascheretti P.
1997	Modèles et modélisation dans les séquences de travaux pratiques sur le haut-parleur en classe de seconde	Didaskalia	Luc C., Durey A.
	Activités de modélisation des élèves en situation de travaux pratiques traditionnels : introduction expérimentale du concept	Didaskalia	Bécu-Robinault, K.

⁴² Je me suis appuyée sur les revues suivantes : Aster, Didaskalia, Recherches en didactique des sciences et de la technologie, Education et Didactique. Il n'a pas été possible d'effectuer un travail identique avec la revue « recherche en didactique – cahiers Théodile », dont le site ne dispose pas d'un moteur de recherche à partir de mots clés.

⁴³ Je n'ai pas retenu les articles mentionnant le terme « modèle » avec un sens de « modèle pédagogique » ou « modèles cognitifs ». Seuls sont comptabilisés les articles dont le sens de ces termes est en relation avec les modèles ou les démarches scientifiques. Dans le cas de la revue « Education & didactique », je n'ai sélectionné que les articles en lien avec les sciences expérimentales (SPC, SVT).

	de puissance		
1998	Enseignement des modèles de liaison chimique	Didaskalia	Simon D.
1999	La propagation des ondes en dimension 3 : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico-ondulatoire	Didaskalia	Maurines L.
2000	Comment aider à modéliser le ciel et la terre	Aster	Merle H.
2003	Richesses et limites d'un " modèle matérialisé " informatisé en optique géométrique	Didaskalia	Buty C.
	Les connaissances professionnelles locales : le cas d'une séance sur le modèle particulaire	Didaskalia	Morge L.
2005	Évaluation cognitive d'un logiciel de modélisation auprès d'élèves de collège	Didaskalia	Smyrnajou Z., Weil-Barais A.
2006	Une typologie des fonctions des modèles formels : <i>l'exemple de la biologie</i>	Aster	Ney M.
	Introduction. Modélisation et simulation dans l'enseignement scientifique : <i>usages et impacts</i>	Aster	Coquidé M., Le Maréchal J.-F.
	Une approche intégrée de la modélisation scientifique assistée par l'ordinateur	Aster	Riopel M., Raïche, G., Potvin, P., Fournier F., Nonnon P.
	Modélisation : une approche épistémologique	Aster	Sensevy G., Santini J.
	Modélisation dimensionnellement réductrice et traitement " particulaire " dans l'enseignement de la physique	Didaskalia	Viennot L.
2007	Le modèle particulaire au collège : fluctuations des programmes et apports de l'histoire des sciences	Didaskalia	Brehelin D., Guedj M.
	Jeux épistémiques et modélisation en classe ordinaire : <i>les séismes au cours moyen</i>	Didaskalia	Santini J.
2008	Élaboration et expérimentation d'un modèle de frottement de glissement entre un solide et un support : <i>diagramme de frottement de glissement</i>	Didaskalia	Aissaoui A., Benjelloun N.
	Quelles relations entre modélisation et investigation scientifique dans l'enseignement des sciences de la terre?	Education & didactique	Sanchez E.
2009	Le modèle et son phénoménographe	ASTER	Beaufils D.
2010	Modélisation et registres sémiotiques : exemple d'étude de manuels de physique de terminale	RDST	Malonga Mounghabio F., Beaufils D.
2011	Enseigner le concept d'ADN en lien avec la démarche historique : un processus de modélisation négociée	RDST	Dahmani, H.-R., Schneeberger P.
	Histoire des sciences et enseignement du modèle de la tectonique des plaques	RDST	Savatou P.
2013	Une étude du système de jeux de savoirs dans la théorie de l'action conjointe en didactique. Le cas de l'usage des modèles concrets en géologie au Cours Moyen	Education & didactique	Santini J.

Par ses critères de sélection, ce tableau passe sous silence de nombreux articles relatifs à ces concepts, et les publications dans d'autres revues, notamment internationales. Il indique toutefois l'intérêt ininterrompu de la communauté de recherche en didactique pour la modélisation et les modèles.

Sur les 39 articles cités, 31 sont en lien avec les sciences physiques et chimiques ce qui prouve que cette approche est particulièrement adaptée aux spécificités du fonctionnement de ces disciplines. On remarque également que le modèle particulaire a occupé une place de choix dans les premières publications traitant des modèles.

Après ce bref aperçu et pour caractériser les approches actuelles, il est important de comprendre ce qui a conduit à étudier autant les modèles et la modélisation⁴⁴.

2.4.2 Des modèles scientifiques aux modèles scolaires

A l'instar des difficultés rencontrées par les épistémologues, les didacticiens peinent à s'entendre sur une transposition de la définition des modèles et sur leurs utilisations pour l'enseignement et l'apprentissage de la physique. Les relations des modèles avec les lois, les théories, les analogies ou avec la démarche scientifique leur ont valu d'être âprement discutés dès les années 80, au point de consacrer de numéro 7 de la revue ASTER aux modèles et à la modélisation. Pour dépasser les débats qualifiant de « phénomènes de mode » la place accordée aux modèles dans les questionnements didactiques, les chercheurs invoquent des positionnements épistémologiques ou issus des disciplines de référence. Ces positionnements fondent l'intérêt porté par la communauté didactique aux modèles et questionnent le peu de place accordé alors à ces modèles dans l'enseignement scientifique. Conformément à mon approche épistémologique et quelles que soient les définitions retenues et les difficultés à différencier le modèle des autres éléments mobilisés dans les démarches scientifiques, l'attention accordée aux modèles impose de considérer la nécessaire articulation entre le monde réel et les outils conceptuels à disposition : *« la distinction n'est pas toujours nette entre modèle et théorie ou entre modèle et loi. Mais quel que soit le concept auquel on s'attache, une réflexion sur modèle, loi et théorie ouvre la question du rapport entre les phénomènes de la réalité et ce qui en est dit dans le discours scientifique, entre le "réel" et le "construit" »* (Drouin, 1988, p. 5). Ces premières discussions au sein de la communauté de recherche en didactique des sciences se sont également portées sur les outils mathématiques dans les modèles scientifiques : *« la mathématisation donne au modèle la possibilité de mettre en relation des paramètres, qui, mis en œuvre dans une expérimentation, susciteront de nouveaux paramètres, amenant ainsi une rectification du modèle. Il y a ainsi un balancement continu entre la formalisation et le retour au concret. Cette formalisation s'opère à travers des lois qui sont les éléments quantifiables et mathématisables du modèle »* (Ibid. p. 7).

De manière générale, l'utilisation des modèles (produits finis) et de la modélisation (processus d'élaboration, d'amélioration des modèles) tient à la volonté d'aider les élèves à développer, via un enseignement scientifique de qualité, *« des représentations du monde plus opérantes que celles qu'ils ont pu construire dans leur vie quotidienne »* (Lemeignan & Weil-Barais, 1988, p. 121). Pour cela, il faut que les modèles enseignés soient plus opératoires que les conceptions premières pour aborder les situations étudiées en classe. Ces auteurs articulent ainsi les travaux sur les modèles avec d'autres travaux de la didactique sur les conceptions, à l'époque déjà plus anciens : *« il convient d'examiner la nature des objets de connaissance enseignés et l'écart qui existe entre les conceptions premières des élèves et les conceptualisations scientifiques »* (Ibid., p. 124). Le passage des conceptions initiales des élèves à la mobilisation d'un modèle scientifique est marqué par les différences de description que les élèves pourront en faire : *« les élèves doivent passer d'une représentation des objets en jeu dans les expériences (les objets sont généralement définis par leurs propriétés et leurs fonctions), des manipulations qu'ils font (pousser, lancer, lâcher...) et des événements perçus (les objets roulent, se déplacent, de heurtent, se séparent, explosent...) à une représentation des objets traduits en termes de systèmes dont les états sont décrits par des valeurs de grandeurs physiques »* (Ibid., p. 124). Le modèle enseigné aura donc pour fonction d'obtenir une description des objets en interaction dans un système donné. Pour cela, les élèves devront sélectionner les événements qu'il est pertinent de décrire, opérer un découpage

⁴⁴ Je ne traiterai pas ici de la modélisation en mathématiques, même si elle est répond aussi à un besoin de mettre en relation des concepts, des propriétés et les objets sur lesquels il est possible d'agir « *« Assimiler une culture des modèles, c'est donc se rendre capable de considérer le modèle, non dans un rapport mimétique à la réalité (...); mais comme un système de signification susceptible de nous apprendre des choses sur la réalité, et par là même, de nous rendre susceptible d'agir sur elle »* (Mercier & Sensevy, 1999).

temporel qui décrit les états du système avant et après les interactions, et qui hiérarchise les causes des modifications du système. Ainsi, « *comparativement aux représentations premières des élèves qui se présentent comme un mélange de descriptions phénoménologiques et d'appel à des propriétés et à des fonctions des objets, la démarche physique consiste à ne retenir que les états qui peuvent être décrits à l'aide de grandeurs physiques reliées entre elles par une relation générale utilisée à titre de présupposé dans l'analyse* » (Ibid., p. 127). Les modèles scientifiques doivent expliquer et prévoir les événements avec plus de précision que les conceptions initiales.

Cette nécessité a guidé de nombreux travaux en didactique proposant des modèles scolaires, en adéquation avec les modèles scientifiques mais aussi avec les potentialités des élèves et se donnant les moyens d'étudier les situations d'enseignement : « *prendre en considération ces deux caractères, théorique et fonctionnel, des modèles dans une démarche d'enseignement suppose tout d'abord d'assurer la cohérence entre les modèles objets de l'enseignement d'une part, les phénomènes et questions sur ces phénomènes d'autre part. Se pose également la question de l'adéquation de ces choix par rapport aux possibilités cognitives des élèves* » (Méheut, 1996, p. 9). Par exemple, ces impératifs ont guidé l'élaboration du modèle particulaire (Chomat & al., 1988 ; Larcher & al., 1990 ; Méheut & Chomat, 1990), ou du modèle énergétique que j'ai travaillé au cours de mon doctorat (Bécu-Robinault, 1997a). Ces choix conduisent à proposer des modèles, constitués par un ensemble de concepts structurés par des lois et principes conformes au point de vue scientifique, et adaptés à la situation expérimentale à étudier.

Robardet et Guillaud (1997) donnent deux raisons fondamentales de recourir aux modèles dans l'enseignement des sciences :

- les théories scientifiques sont trop complexes et les formalismes mathématiques sur lesquels elles s'appuient ne sont pas accessibles aux élèves ;
- l'enseignement d'un modèle oblige à utiliser la structuration des concepts et des lois qui le composent et qui permettent de rendre compte des systèmes étudiés.

Afin de différencier le modèle des théories scientifiques et de le mettre en relation avec la réalité sensible à étudier, Robardet et Guillaud résument sur un schéma les propriétés interprétatives ou prédictives du modèle (Figure 16).

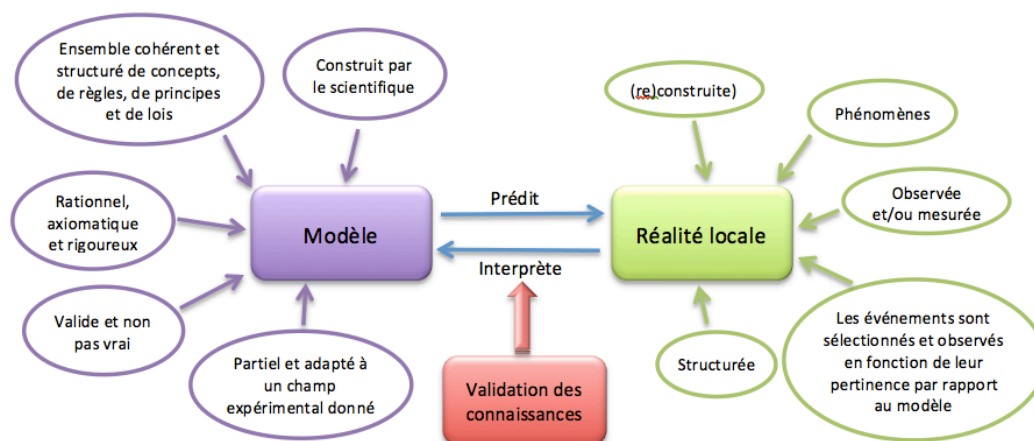


Figure 16 : les propriétés du modèle selon Robardet & Guillaud (1997, p. 105)

Prenant appui sur les positions d'épistémologues, ils considèrent que le « modèle est un instrument théorique construit en vue d'interpréter et de prévoir des événements concernant des phénomènes. Un même modèle est généralement capable de rendre compte de plusieurs phénomènes différents. De plus, chaque phénomène est susceptible de se manifester dans des situations fort diverses. L'intérêt

principal d'un modèle est donc de rendre compte, de manière particulièrement économique, de phénomènes n'ayant apparemment que peu de rapport entre eux » (Robardet & Guillaud, 1997, p. 97). Dans le même temps, un modèle « est toujours construit en vue d'interpréter, de prévoir, d'expliquer un ensemble bien défini et bien délimité de phénomènes » (Ibid., p. 105). Ce positionnement les conduit à considérer que l'enseignement scientifique se doit d'insister sur la différence entre modèle et réalité, et que le champ de référence dans lequel le modèle fonctionne doit être étudié.

2.4.3 La modélisation comme activité nécessaire à l'apprentissage de la physique

Les travaux en didactique qui étudient les activités de modélisation se réfèrent soit aux travaux de Martinand (1992) soit à ceux de Tiberghien (1994). Tous deux s'appuient sur un auteur commun (Walliser, 1977) pour proposer une distinction *a priori* similaire entre deux mondes, l'un en relation avec les concepts théoriques et l'autre avec le champ empirique. Toutefois, ces auteurs s'opposent sur ce que recouvrent effectivement le champ empirique et les concepts théoriques.

Martinand (1996), différenciant les registres du modèle et le référent empirique, considère cette distinction comme un aménagement de la théorie du signe de Saussure ou de la conceptualisation de Vergnaud. Les modèles, exprimés à l'aide de signifiants, peuvent être associés à des signifiés et ont le rôle des théorèmes et concepts. Le référent empirique est constitué non seulement des objets, des événements, mais aussi de toutes les connaissances acquises pour agir sur ces objets et pour décrire les phénomènes. Ces connaissances, « *inconsciemment projetées sur la réalité* » (Ibid, p. 14), constituent avec les objets et les événements le référent empirique. Dans cette approche, « *il n'y a pas opposition ontologique entre modèle et référent, mais plutôt une différence d'ordre conjoncturel. Ce qui est référent à un moment donné est une description qui remplace la réalité qu'on ne connaît pas ; de la même manière, un modèle peut se substituer à une description antérieure et être incorporé comme phénoménologie dans un nouveau registre* » (Bisault & Berzin, 2009, p. 77). Ce rôle différent attribué au modèle, en fonction des connaissances acquises, est en conformité avec le point de vue de Walliser sur la hiérarchie des modèles empiriques et théoriques. Le schéma de la modélisation proposé par Martinand (Figure 17) précise également les systèmes symboliques fournis par le modèle pour représenter, prévoir ou expliquer le référent empirique. Ce schéma distingue la description telle que les élèves peuvent la faire avant enseignement, qui donne lieu à une construction consensuelle (phénoménographie) et la description où le modèle est mobilisé, appliqué pour rendre compte du référent empirique (phénoménologie). Cette distinction apparaît comme nécessaire au niveau du référent empirique pour expliquer que les élèves ne lisent pas spontanément les situations étudiées, le monde réel, comme l'enseignant.

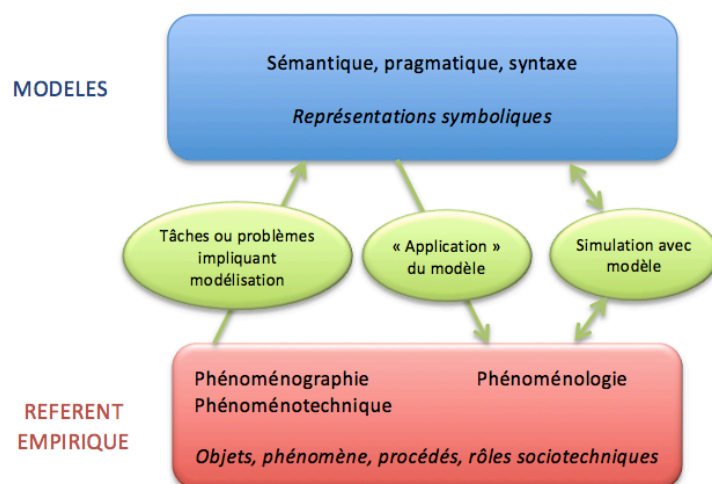


Figure 17: les registres des modèles et du référent empirique selon Martinand, 1996, p. 15.

Selon l'approche de Martinand, les connaissances scientifiques sont peu à peu intégrées au référent empirique: « le statut des objets de pensée manipulés change au cours du temps, en fonction des besoins momentanés et de l'expertise acquise qui restructure les théories et intègre les descripteurs ou en change de façon radicale. Ce qui est référent à un moment n'est qu'une description première mais néanmoins partagée qui remplace la réalité qu'on ne connaît pas » (Larcher, 2003, p. 307). L'intégration progressive des connaissances au référent empirique favorise l'étude curriculaire des évolutions des modèles mis en œuvre par les élèves. Les analyses porteront sur la manière dont les élèves construisent peu à peu le registre des modèles, même si cette approche nécessite des précautions quant à l'attribution d'une action à l'un ou l'autre des registres, cette attribution reposant sur des hypothèses quant au niveau de construction actuelle des élèves (Bisault & Berzin, 2009). Ces auteurs proposent par exemple d'attribuer « au niveau du registre des modèles ce qui déjà été énoncé par les élèves comme un élément explicatif préalable » (Ibid., p. 80).

L'approche de Tiberghien (1994), que j'ai présentée en paragraphe 1.3, p. 9 de l'introduction de cette note de synthèse, et dans laquelle j'inscris mes travaux, distingue les modèles naïf et scientifique. Le monde des objets et événements ne comporte que la description de ces éléments, dans une langue soit scientifique soit quotidienne, mais n'intègre pas les connaissances (scientifiques ou quotidiennes) sur ces éléments. Cette approche n'est pas destinée à analyser la manière dont les élèves élaborent le modèle, mais plutôt le processus d'articulation et de distinction de ces mondes. L'hypothèse sous-jacente est que l'apprentissage de la physique passe par ces articulations entre monde des théories et modèles et mondes des objets et événements. L'enseignant se doit donc de proposer à ses élèves des activités conduisant à distinguer et à mettre en relation les éléments les composant.

La littérature internationale avance également de nombreux arguments en faveur d'un enseignement favorisant les activités de modélisation. Pour Justi (2009), les activités de modélisation aident au développement de compétences scientifiques importantes pour l'éducation du citoyen : « *model building can provide a context for students to build scientific arguments, to state a position and then justify the claim, or position, with evidence. It can also provide students a context to think about the purpose of science, and the purpose of tools of science (like models and theories), thus becoming a powerful activity for engaging students in doing and thinking about science* » (Ibid., p. 32). Pour Gilbert et al. (2000), la modélisation et les modèles contribuent à une véritable éducation scientifique pour trois raisons :

- en fondant son enseignement sur la modélisation, on favorise la modélisation mentale qui est essentielle pour la compréhension des phénomènes comme des corps de connaissances déjà constitués ;
- les expériences mettant à l'épreuve les modèles sont essentielles dans les démarches scientifiques ;
- la compréhension des modèles historiques et scientifiques, qui sont des productions fondamentales de la science, est un enjeu majeur de l'éducation scientifique.

Si pour Van Driel et Verloop (1999) les enseignants ont une perception des modèles et de la modélisation non cohérente, pour Justi (2009) il manque surtout aux enseignants des connaissances sur la manière de mobiliser la modélisation en classe. Selon elle, ce ne sont donc pas tellement des connaissances sur les modèles scientifiques qui font défaut aux enseignants que des connaissances sur leur utilisation en classe à des fins d'apprentissage. Ainsi, l'élaboration de séquences d'enseignement au sein d'un projet Design-Based Research peut être un moyen pour aider enseignants à intégrer des activités de modélisation à des séances de physique conformes aux instructions officielles.

2.4.4 La modélisation comme articulation de deux niveaux de description

Tous les travaux cités indiquent que la construction des connaissances scolaires en physique nécessite l'articulation de deux niveaux de description d'une situation (celui des modèles et celui des objets et événements) qui s'opposent et se complètent par leur composition. Cette articulation est à la base de la modélisation et prend sa source dans l'épistémologie de la physique. L'objectif de mes recherches est d'analyser les processus d'étude de la physique par des élèves en mettant en évidence les articulations entre ces niveaux de descriptions. Il me faut donc définir les éléments constitutifs de chacun de ces deux niveaux, en prenant appui sur l'épistémologie de la physique. Un des éléments qui pose particulièrement question quant au niveau de description auquel il correspond est celui de la mesure.

Le niveau des objets et événements ne contient pas de systèmes explicatifs : il constitue l'objet d'étude non interprété du physicien. Le niveau des théories et modèles contient quant à lui tous les systèmes interprétatifs et explicatifs permettant la mise en relation des différentes grandeurs physiques. Il est constitué d'instruments *théoriques* donnant au physicien les moyens de lire les faits issus du niveau des objets et événements (Piaget et Garcia, 1983). Cette lecture se fait à partir de la sélection et de la transformation des informations issues de ce monde (Bachelard, 1979). Lorsque le physicien interprète les événements, il les reconstruit en sélectionnant ceux qu'il juge pertinents, en fonction de ses connaissances, de ses objectifs. La sélection et la transformation des informations posent le problème de la définition de la frontière entre les différents éléments des deux niveaux. Les points de vue purement empiristes postulant que toute connaissance vient de la transformation de nos observations en idées (Condillac, Hume, Locke, Aristote) sont très discutables, même s'ils ont longtemps justifié la place première de l'expérience dans l'enseignement. Il paraît évident que l'observation est fortement pilotée par les idées. Les éléments issus directement du monde réel (les objets, les événements) doivent être distingués de ceux sous influence des choix du physicien comme le modèle, la théorie mobilisés.

Du fait de la place importante prise par les formalismes mathématiques et les données numériques, une difficulté réside dans la distinction de sous-niveaux intermédiaires, non nécessairement imbriqués au sens d'Halbwachs, impliquant les activités de recueil (mesure) et de traitement de ces données par les outils mathématiques à disposition du physicien.

Pour des épistémologues comme Bachelard (1972), Pickering (1992), Gooding (1989) l'information obtenue à partir d'une expérience est toujours liée à l'interprétation et donc à la théorie ou au modèle

choisi : « *all accounts of scientific activity, even those recorded in laboratory notebooks, involve reconstruction* » (Gooding 1989, p. 18). Ceux-ci reconnaissent qu'il est possible d'opérer une dichotomie et de séparer ce qui ressort du domaine du champ expérimental et ce qui est issu des théories et modèles. Ainsi, Grandy (1992) définit la mesure comme étant une observation technique et la positionne sur un plan proche des observations. « *Observation and measurement are both processes by which we wrest information about nature from the world and do some processing so that it can be used in theoretical reasoning* » (Ibid., p. 187). Picavet (1995) donne à la mesure un statut proche de l'observation à laquelle elle ne fait qu'apporter une précision quantitative. Mon objectif étant d'analyser les processus d'étude de la physique par des élèves, un autre argument pour associer la mesure au niveau des objets et événements est qu'il semble difficile au novice de séparer la mesure de l'instrument qui l'a générée en explicitant la théorie sous-jacente à la conception l'instrument. Ce point de vue est plus discutable dès qu'il est question d'intégrer les incertitudes de mesure par exemple.

Un autre élément, dont la position dans une représentation bipolaire du fonctionnement de la physique pose question, est relatif au traitement numérique de valeurs mesurées. La définition de ces traitements dans une description du fonctionnement de la physique apparaît déjà problématique dans les travaux de Galilée, lorsqu'il tente d'articuler la relation complexe entre théorie et expérience, en employant deux formes de discours aux statuts jusqu'alors bien distincts : les mathématiques et la physique (Thuillier, 1988). Toute la difficulté de Galilée fut alors de redéfinir la relation entre ces formes de discours (Cantor, 1989). Sous-jacentes à ces problèmes, c'est le poids de l'outil mathématique dans les théories et modèles physiques qui pose question. La double référence implicite des traitements de données à la mesure et à la théorie génère une ambiguïté quant à leur position dans cette classification (Giere, 1988). Les techniques de traitement des données apparaissent le plus souvent entre le niveau du monde réel et celui du modèle (Walliser, 1977 ; Paty, 1994). Ainsi, le traitement numérique des données nécessitant obligatoirement une action de sélection puis de transformation est, dans son essence même, une des prémisses aux activités internes au niveau du modèle et donc à la modélisation. Ce cheminement me conduit à définir non pas un niveau du modèle mais deux : le premier niveau, proche de la théorie est celui contenant l'ensemble des grandeurs physiques pertinentes à l'interprétation de la situation expérimentale. Il contient également toute forme de relations entre ces grandeurs physiques. C'est le niveau que je nommerai *modèle physique*. Le deuxième contient quant à lui les variables pertinentes du point de vue du traitement des données, c'est à dire les expressions littérales comportant aussi des nombres, sans lien *explicite* avec la physique, mais aussi les techniques de traitement, et toutes leurs formes de représentations (graphes, équations...). Ce niveau que je définirai par la suite comme étant celui du *modèle mathématique* est celui des traitements purement mathématiques de l'information. Il est à noter que le modèle physique peut faire intervenir des relations mathématiques entre les grandeurs physiques, mais que dans ce cas, les relations entre les valeurs et les concepts physiques sont explicites (voir le paragraphe 5.1, p. 93, de ce chapitre pour une définition précise des critères associés aux différents niveaux de modélisation).

La décomposition du niveau des modèles en plusieurs niveaux (qui, dans le cadre de l'enseignement peuvent entretenir des relations d'emboîtement ou de complémentarité) suppose le recours à des langues plus ou moins formalisées. Sans faire de référence aux travaux conduits en sciences du langage, Walliser (1977, p. 126) propose trois types de langues⁴⁵ :

⁴⁵ Dans son ouvrage, Walliser utilise le terme « langage ».

- les langues littéraires, qui peuvent être par exemple les langues en usage dans la société, formés de symboles comme les lettres, les caractères de ponctuation, ou des langages spécialement élaborés comme les langages informatiques, qualifiés par Walliser de langages universels ;
- les langues iconiques, dont les constituants sont des symboles graphiques (graphes, matrices, diagrammes...)
- les langues logico-mathématiques, élaborés à partir de symboles abstraits, logiques ou signifiants.

Ces différentes langues sont nécessaires à la communication des contenus des modèles. Aussi, il est crucial de s'intéresser à ces supports pour comprendre quelles sont les informations qu'ils véhiculent sur les éléments de la situation, sur leur mise en relation et donc mettre en évidence comment ils participent aux activités de modélisation.

3 Les représentations sémiotiques

Il suffit d'ouvrir un manuel de physique pour constater le nombre considérable de représentations mobilisées.

TRAVAUX PRATIQUES

Mesure du couple d'un moteur électrique

But du TP

Étudier le moment du couple d'un moteur électrique à courant continu, alimenté sous une tension constante, en fonction de sa vitesse de rotation.



1 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le moteur M est alimenté par un générateur de tension continue (6 V) capable de débiter un courant d'intensité importante (5 A). L'arbre du moteur est solidaire de celui d'une génératrice G . Un rhéostat R_h ($10\ \Omega$; 5 A) est monté entre les bornes de sortie de celle-ci. Un petit aimant, fixé sur l'arbre commun du moteur et de la génératrice, tourne devant une bobine. La fréquence de la tension induite est mesurée à l'oscilloscope : c'est la fréquence de rotation du moteur.



3. a. Relever les nombres n_b de divisions horizontales par période sur l'écran de l'oscilloscope, ainsi que les coefficients de balayage b utilisés.

b. Déterminer la vitesse N de rotation (ou « régime ») du moteur en tours par seconde.



2 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Le principe de la mesure du moment du couple exercé par le moteur sur le rotor de la génératrice est exposé dans la fiche Méthode.

- Réaliser le montage conformément au schéma suivant (ci-dessus, à droite).
- Déplacer le curseur du rhéostat de façon que le moment M_r du couple désigné par l'index prenne les valeurs de la première ligne du tableau ci-contre à l'équilibre de l'inducteur.

EXPLOITATION DES RÉSULTATS

1. Remplir les lignes 2, 3 et 4 du tableau suivant :

$M_r (10^{-3}\ \text{N}\cdot\text{m})$	2	5	10	15	20	25
$b\ (\text{ms/div})$						
$n_b\ (\text{div})$						
$N\ (\text{tr}\cdot\text{s}^{-1})$						
$M_m (10^{-3}\ \text{N}\cdot\text{m})$						

2. Écrire la relation entre les moments M_m (moteur) et M_r . Remplir la cinquième ligne.

3. Tracer la courbe représentant les variations de M_m en fonction de N , pour une tension d'alimentation du moteur égale à 6 V.

- Quel est le sens de variation du couple moteur en fonction du « régime », à tension d'alimentation constante.
- Trouver quelques situations analogues dans la vie courante.

Figure 18: exemple de fiche de TP de première S, Bordas, 1994, p. 133

La Figure 18 illustre une partie de cette diversité, puisque dans ce TP, on demandera aux élèves de s'appuyer sur un dispositif expérimental (photographié et schématisé), de réaliser des mesures par relevé de nombres sur un oscilloscope, de compléter un tableau de mesure (et donc convertir les nombres en d'autres nombres), d'écrire une relation entre les grandeurs (utilisation de relations algébriques) et de tracer une courbe (transformer les nombres en points, puis transformer la succession de points en une courbe). C'est de l'ensemble de ces informations que l'on conclura sur le sens de variation en fonction de la vitesse de rotation (ce qui revient à décrire la courbe avec une phrase), également appelée « régime ». Cet exemple illustre non seulement cette diversité, mais aussi le travail demandé à des élèves, ici de première, concernant l'articulation de ces différentes représentations pour élaborer une relation qui sera intégrée au modèle étudié.

Ces représentations, mobilisées quotidiennement par les scientifiques (Latour, 2006) sont essentielles pour l'étude de la physique, même si elles ne font pas systématiquement l'objet d'un enseignement spécifique. Dans mes travaux, je les ai considérées comme étroitement liées aux modèles étudiés en classe, car elles peuvent être porteuses de significations différentes des concepts ou des relations et sont nécessaires à la communication entre pairs, entre enseignants et élèves.

Les recherches en didactique des mathématiques et des sciences ont porté très tôt un intérêt pour l'étude des connaissances naïves des apprenants. En mathématiques, il s'agissait d'étudier la construction des concepts via des schèmes, règles d'action, invariants opératoires (Vergnaud, 1991). Initialement, la didactique des sciences s'est davantage tournée vers le rôle des conceptions et des théories naïves. Cet intérêt pour la reconstruction des conceptions des élèves a diminué l'intérêt des chercheurs en didactique des sciences pour les représentations sémiotiques (Hitt, 2004). Pourtant, il apparaît de la présentation de la modélisation dans la partie précédente que les représentations sémiotiques associées aux modèles véhiculent des significations qu'il convient d'explicitier. Ces représentations font par ailleurs l'objet d'un apprentissage en classe de physique au collège, comme je l'exposerai succinctement.

En didactique des mathématiques, les travaux de Duval (2002) sur les différents registres de représentation ont mis en évidence les difficultés inhérentes à la maîtrise des règles d'élaboration de chacune des représentations, au passage d'une représentation à une autre et à la nécessité d'articulation de ces représentations pour élaborer le sens des concepts.

Dans cette partie, je présenterai tout d'abord quelques éléments concernant la place des représentations sémiotiques dans l'enseignement des sciences, la définition des représentations sémiotiques en sciences du langage, en psychologie cognitive et en didactique des mathématiques pour ensuite exposer la manière dont je les ai mobilisés dans mes recherches en didactique de la physique.

3.1 Les représentations dans les programmes officiels de sciences physiques

Il n'est pas question ici de faire un historique des représentations dans les programmes, mais plutôt de voir comment les programmes en lien avec les projets auxquels j'ai contribué ont pris en charge les représentations sémiotiques associées aux modèles.

Lors de mon doctorat, les programmes officiels du lycée étaient encore traditionnellement centrés sur l'enseignement des lois, la définition des concepts. Si les instructions concernant la construction de chaînes énergétiques visaient implicitement des objectifs en termes de représentation, les véritables objectifs d'apprentissage concernaient davantage les lois, les relations entre grandeurs et la

compréhension des phénomènes en jeu. Aucun travail n'était véritablement centré sur la mise en relation des chaînes tracées et des situations expérimentales étudiées⁴⁶. Si les programmes font références aux représentations, ce terme est utilisé comme synonyme de modélisation : « *l'enseignement doit faire ressortir que la physique est un élément de culture essentiel en montrant que le monde est intelligible et que l'extraordinaire richesse et complexité de la nature et de la technique peut être décrite par un petit nombre de lois physiques universelles qui constituent une représentation cohérente de l'univers* » (MEN, 1992, p. 26). Cet extrait montre par ailleurs que, dans les instructions officielles, les lois ont davantage le statut de théories universelles que de modèles locaux.

Les programmes de collège de 2005 portent un intérêt indéniable aux représentations. Ainsi, il est indiqué les types de représentations à utiliser et comprendre, comme dans la partie dédiée à l'étude qualitative des circuits en courant continu en cinquième : « *reconnaître et utiliser les symboles normalisés : pile, lampe, moteur, fils de connexion, interrupteurs* », « *représenter le schéma normalisé d'un montage présent sur la paillasse* », « *repérer un boucle sur un schéma et un montage* » (MEN, 2005b, p. 47). L'articulation de ces représentations avec la situation expérimentale est explicitée : « *passer du schéma normalisé au circuit et inversement* » (Ibid., p. 47). Dans ces articulations, le schéma normalisé est considéré comme un modèle pour expliquer, interpréter la situation expérimentale. Les instructions officielles mentionnent aussi les compétences relatives à la manipulation des représentations sur les contenus relatifs à l'optique : « *formuler que l'on peut visualiser le trajet de d'un faisceau de lumière grâce à diffusion. Et en faire un schéma* », « *représenter un rayon de lumière par un trait repéré par une flèche indiquant le sens de la propagation* » (Ibid., p. 48). La fonction interprétative de ces représentations, en lien avec le modèle de l'optique géométrique auxquelles elles sont associées est également explicitée : « *interpréter les ombres propre et portée ainsi que l'existence du cône d'ombre en figurant des tracés rectilignes de lumière* » (Ibid., p. 48). Les programmes de quatrième s'inscrivent dans la lignée de ceux de cinquième et, en intégrant d'autres représentations telles que les graphiques et les tableaux de valeurs, donnent le statut de compétences transversales à ces articulations : « *schématiser puis réaliser un montage permettant d'aboutir à la caractéristique d'un dipôle ohmique ; présenter les résultats de mesures sous forme de tableau ; tracer la caractéristique d'un dipôle ohmique* » (Ibid., p. 56).

Les nombreux changements de programme ensuite opérés au collège n'ont pas démenti l'intérêt accordé aux schémas, graphes, et autres représentations, à leur utilisation. Les programmes de 2008 indiquent même que les élèves doivent « *proposer une représentation adaptée pour montrer la proportionnalité de U et de I* » (MEN, 2008, p. 20). Il s'agit donc bien d'un objectif d'enseignement et d'apprentissage, en lien avec les modèles mobilisés pour interpréter, expliquer, et prévoir les situations expérimentales étudiées.

3.2 Définition des représentations sémiotiques

Avant de décrire les usages et apports des représentations sémiotiques en didactique, je présente ces objets tels qu'ils ont été initialement définis et étudiés en linguistique et en psychologie cognitive.

La plupart des auteurs opposent représentations internes et externes, représentations conscientes et non conscientes. Les représentations externes et internes contribuent toutes deux à la manière dont un individu construit du sens aux activités conduites. Les représentations externes peuvent être matérielles, portées par des symboles ou objets symboliques, ou être sous-jacentes à l'organisation d'éléments matériels : « *external representations are in the world, as physical symbols (e.g. written symbols, beads of abacuses, etc.) or as external rules, constraints, or relations embedded in physical configurations (e.g. spatial relations of written digits, visual and spatial layouts of diagrams, physical constraints in abacuses, etc.)* » (Zhang & Norman,

⁴⁶ C'est pourtant sur cet aspect qu'a porté l'essentiel de mon travail comme je l'exposerai au chapitre suivant.

1994, p. 89). Dans mes recherches, je m'intéresse uniquement aux représentations qui sont produites intentionnellement, par l'enseignant ou les élèves, à des fins de communications. Ces représentations conscientes et externes, sont qualifiées par Duval (1995) de représentations sémiotiques. Ces représentations sont supposées aider la mémorisation, fournissant une information qui peut être directement perçue et utilisée sans interprétation, fondant et structurant le fonctionnement cognitif, et changeant la nature de la tâche⁴⁷ (Zhang et Norman, 1994). Les modèles étant formulés sur la base de représentations sémiotiques influençant les activités des élèves, il est donc essentiel de caractériser ces représentations.

3.2.1 La sémiotique

En linguistique, les travaux se sont longtemps focalisés sur le langage oral, jusqu'à ce que la sémiotique fasse cas des signifiants visuels et envisage l'écriture autrement que comme une simple transcription de la parole. Saussure et Pierce apparaissent comme les pères fondateurs de la sémiotique. Sans entrer dans les détails de leurs approches, qui ne sont pas l'objet de cette note de synthèse, je précise ci-dessous une des différences les opposant sur la construction du sens des signes.

Saussure (Roulet, 1975) affirme l'arbitraire du signe, qui est la plus petite unité significative. Son modèle peut être qualifié de dyadique, car il définit le signe linguistique comme étant composée de deux facettes indissociables : le signifiant et le signifié. Il propose un modèle structuraliste qui s'intéresse à la langue seule, au système qui la compose et à son fonctionnement immanent. Pour Saussure, les références à la parole, au sujet et à la psychologie sont absentes : le fonctionnement de la langue s'explique par des règles internes. Dans son modèle de communication, la transmission s'opère par phonation et audition, les interactants étant supposés partager le sens porté par les signes linguistiques. L'approche de Saussure n'explique pas les différences de sens liées à la culture ayant donné naissance aux signes.

Contrairement à Saussure, Peirce (Everaert-Desmedt, 1990) énonce que toute chose peut être un signe à partir du moment où il entre dans un processus sémiotique. Un processus sémiotique est un rapport triadique entre un *representamen* (le signe), un *objet* et un *interprétant*. Le *representamen* est une potentialité qui exprime quelque chose à propos de l'objet. L'objet est ce que le signe représente. Le *representamen* examiné par un interprète, déclenche un interprétant, qui devient à son tour un *representamen*. Cet interprétant devenu *representamen* peut renvoyer par l'intermédiaire d'un autre interprétant, au même objet que le premier *representamen*. Cette approche a pour intérêt de prendre en considération les contextes de production et de réception des signes, qui sont définis par leur action sur leurs interprètes.

L'approche de Saussure distingue clairement la sémiotique de la sémantique sans les mettre en relation. Le rôle de l'interprétant selon Peirce questionne les aspects relatifs à la communication et donc le sens construit par les individus aux signes mobilisés dans l'interaction. La construction de la signification est très présente dans les travaux de Benveniste (Derycke, 1994). S'appuyant initialement sur ceux de Saussure, il va les critiquer en distinguant le signifié, qui est une facette du signe et renvoie à une catégorie générale, et le référent, qui est l'objet particulier désigné dans un contexte spécifique. « *Par opposition au signe, unité sémiotique, qui renvoie toujours à d'autres signes, le mot, unité sémantique, puis la phrase, organisation sémantique plus complexe, se réfèrent toujours à un certain état de la réalité. Or, celle-ci étant, par*

⁴⁷ Les auteurs donnent l'exemple de la représentation des nombres dans une opération de multiplication comme changeant le fonctionnement cognitif et la nature de la tâche. Une représentation en chiffres arabes 73×27 ne sera pas traitée de la même manière qu'une représentation en chiffres romains $LXXIII \times XXVII$, l'efficacité du traitement en chiffres arabes n'étant plus à démontrer.

définition même, toujours changeante, chaque phrase apporte quelque chose de nouveau » (Mosès, 2001, p. 512). Le langage humain a, pour Benveniste, la propriété de signifier. La sémiotique est le mode de signifiante propre au signe et ne se préoccupe pas du rapport entre la langue et le monde. C'est une propriété de la langue. La sémantique est le mode de signifiante propre au discours, et relève d'une activité du locuteur qui met en action la langue (Derycke, 1994). Ainsi, dans la lignée de Saussure, le signe existe et fonde la réalité de la langue alors que le sens est porté par les mots, la phrase, qui font référence à la situation du discours et implique une posture du locuteur.

Du fait de l'approche historico-culturelle que j'ai adoptée concernant l'apprentissage, et de la nécessité de différencier les significations d'un même terme (désignant un concept) pour un élève et un enseignant, l'approche de la sémiotique intégrant les contextes de production, de réception et donc de compréhension des signes proposée par Benveniste et Peirce est la plus adaptée à mes recherches.

3.2.2 Une approche de la psychologie cognitive

De nombreuses recherches ont été conduites en psychologie sur l'apprentissage avec des représentations externes. Ces représentations, nommées externes en opposition aux représentations internes (i.e. celles que se construisent les apprenants en phase d'apprentissage) sont caractérisées le plus souvent par les modalités sensorielles associées ou les modalités de production: auditives/ visuelles, textuelles/picturales par exemple. Faisant l'hypothèse que la visualisation est essentielle à la pensée scientifique, Ainsworth et al. (2011) associent cinq buts à l'utilisation des dessins en classe de science :

- Motiver les élèves, du fait que leurs dessins projettent leurs propres idées et connaissances sans être contraints par des conventions qu'ils ne maîtrisent pas encore ;
- Apprendre à représenter en comprenant les conventions qui permettent à une représentation de fonctionner plus généralement (cohérence, densité, simplicité), d'être pertinente, et d'acquérir un pouvoir explicatif ;
- Apprendre à raisonner : les représentations ayant des attributs différents, chacune implique de raisonner sur des aspects différents de la situation : observations, mesures, concepts...
- Expliciter ce qui a été compris par les élèves au cours d'une séance, par exemple en faisant dessiner aux élèves ce qu'ils comprennent d'un texte, de manière à porter un regard sur le sens construit, sur les éléments qui sont apparus pertinents aux élèves ;
- Apprendre à communiquer, de même que les scientifiques doivent communiquer pour disséminer leurs idées au sein de leur communauté, les élèves, à travers leurs dessins, échangent avec leurs pairs et clarifient le sens construit aux objets manipulés.

L'approche proposée par Ainsworth (2006) se veut différente de celles classiquement mises en œuvre en psychologie : plutôt que de considérer seulement la forme du système de représentation comme influençant l'apprentissage, elle propose d'intégrer les facteurs liés à la conception de dispositifs intégrant des représentations multiples. Son approche est liée à ce qui constitue une représentation externe, à savoir : le monde représenté, le monde représentant, les aspects du monde représenté qui sont effectivement représentés, les aspects du monde représentant qui font modélisation du monde représenté et enfin la correspondance entre ces deux mondes. Les facteurs qu'elle propose alors d'étudier sont (a) le nombre de représentations utilisées, (b) la manière dont l'information est présente dans les différentes représentations, (c) la forme du système de représentation, (d) l'ordre dans lequel les représentations sont fournies et (e) l'aide apportée pour le passage d'une représentation à l'autre. Ainsi, elle indique que le fait de présenter un trop grand nombre de représentations différentes aux élèves contribue rarement à faciliter l'apprentissage. De plus, l'exceptionnelle redondance entre les informations contenues dans les représentations rend nécessaire le recours à une variété. Ainsi,

mobiliser un minimum d'information dans chaque représentation simplifie leur appropriation par les élèves, mais requiert la mobilisation d'un plus grand nombre de représentation, ce qui *in fine*, complexifie l'apprentissage. Cette approche donne tout son intérêt à une mobilisation rationnelle des représentations si l'on espère favoriser l'apprentissage : « *matching the type of representation to the learning demands of the situation can significantly improve performance and understanding* » (Ainsworth, 2006).

Ainsi, proposer aux élèves de réaliser des dessins en électricité par exemple, leur permet de communiquer sur leur compréhension des circuits électriques étudiés. La production de ces représentations aide les élèves à organiser leur perception de la situation, à expliciter les éléments pertinents pour que le circuit électrique fonctionne. Ces dessins n'étant pas contraints par des connaissances scientifiques à maîtriser, les élèves donnent à voir leurs connaissances antérieures concernant les objets manipulés. Les situations physiques sont toujours relativement complexes à modéliser et donc à représenter. Lors de l'élaboration de modèles à proposer aux élèves, il convient de trouver un équilibre entre la simplicité de chacune des représentations multiples, et la complexité d'une représentation unique. Je présenterai au chapitre suivant un exemple liée à une analogie proposée pour la différenciation des concepts d'énergie et d'électricité.

3.2.3 Apport de Duval en didactique des mathématiques

L'intérêt de Duval pour les systèmes de représentation sémiotique prend sa source dans la spécificité des mathématiques du point de vue des formes d'accès aux concepts. Contrairement à toutes les autres disciplines (y compris scientifiques), pour lesquelles il y a toujours deux modes d'accès à la connaissance, un accès sensoriel direct et un accès sémiotique, « *en mathématiques, l'activité intellectuelle dépend entièrement de représentations sémiotiques* » (Duval, 2009, p. 126) et elle ne peut s'appuyer sur une réalité matérielle. L'accès sémiotique requiert « l'utilisation de *systèmes qui produisent des représentations, indépendamment de toute conservation de données sensorielles comme de toute contrainte physique. Le premier de ces systèmes est le langage, mais il y a aussi les productions graphiques, allant des croquis aux figures géométriques* » (Ibid., p. 129). Son approche s'inscrit dans la lignée de celle de Benveniste, du fait de la variété des systèmes sémiotiques et de la possibilité de les mettre en relation. L'apport de Duval réside dans sa volonté à mettre en évidence le rôle de ces différents systèmes dans la construction des connaissances des individus. Il s'intéresse donc aux systèmes sémiotiques donnant lieu à trois activités cognitives fondamentales :

1. **Constituer une trace perceptible**, ou un ensemble de traces perceptibles, reconnues comme une représentation de quelque chose dans un système donné ;
2. **Transformer les représentations** selon des règles propres à chaque système, afin d'obtenir d'autres représentations fournissant des connaissances nouvelles par rapport aux représentations initiales
3. **Convertir les représentations** d'un système en des représentations d'un autre système, afin de mettre en évidence des significations différentes de ce qui a été représenté.

Parmi l'ensemble des systèmes sémiotiques dont l'homme dispose (et qu'il peut inventer), tous ne permettent pas ces trois activités. Seuls les registres de représentations sémiotiques répondent à ces critères et témoignent des articulations entre la production des représentations et leur compréhension. Ainsi, pour Duval, trois phénomènes sont liés au développement des connaissances d'un individu : la diversification des registres de représentation sémiotique, la différenciation entre le représentant et le représenté et la coordination entre les différents registres de représentation. En abordant les rapports entre *noésis* et *sémiosis*, Duval donne aux représentations sémiotiques d'autres

fonctions que la seule communication. Elles permettent l'objectivation ou le traitement (Duval, 1996). Cette approche explique les difficultés de compréhension en mathématiques par :

- une confusion entre les objets (au sens de Pierce), et leur représentation. En effet, les élèves n'ont pas accès aux objets manipulés en dehors de leur représentation sémiotique
- la multiplicité des représentations disponibles, qui laisse penser que chacune de ces représentations renvoie à des objets différents, et non à des points de vue différents sur un même objet.

Chaque registre sémiotique demande un apprentissage spécifique, et pour apprendre les mathématiques, il faut être capable de changer de registre sémiotique. Effectivement, une des propriétés fondamentales des représentations sémiotiques est leur transformabilité. Ce changement de registre peut avoir pour conséquence une perte d'information sur les contenus manipulés, ce qui est également source de difficultés pour les élèves : *« pour ne pas confondre un objet et sa représentation, lorsque l'intuition directe de l'objet n'est pas possible, il est nécessaire de disposer de plusieurs représentations sémiotiquement hétérogènes de cet objet et les coordonner. [...] la nature du registre sémiotique impose une sélection parmi les éléments significatifs ou informationnels du contenu conceptuel présenté. Cela veut dire que toute représentation est cognitivement partielle par rapport à ce qu'elle représente et que, des représentations de registres différents ne présentent pas les mêmes aspects d'un même contenu conceptuel. »* (Ibid., p. 69). On retrouve dans le choix d'un registre sémiotique pour représenter un contenu, une opération de sélection qui rappelle celle opérée dans le choix du modèle.

Tous les registres ne sont pas équivalents et la diversification des registres est constitutive de la construction de nouvelles connaissances du point de vue de l'individu ou de nouveaux savoirs du point de vue de la communauté scientifique. Selon les informations à traiter, à communiquer, certains registres s'avèrent plus pertinents que d'autres. Pour mobiliser le registre approprié, trois activités cognitives de représentations, en lien avec les activités cognitives fondamentales, sont nécessaires :

- La formation de représentations dans un registre sémiotique donné : « la formation d'une représentation sémiotique est le recours à un (ou à plusieurs) signe(s) pour actualiser la visée d'un objet ou pour se substituer à la visée de cet objet » (Ibid., p. 37). Les registres sémiotiques utilisés pour former les représentations sont le plus souvent déjà constitués et sont donc soumis à des règles, afin que les représentations soient communicables et transformables. Même si la théorie avancée par Duval et tous les exemples qu'il donne sont en lien avec les mathématiques, il est possible de faire des liens avec les activités proposées en physique. Ainsi, dans l'exemple introductif (Figure 18), l'inscription des mesures dans le tableau correspond à la formation de cette représentation organisant les écritures symboliques.
- Le traitement qui est une transformation d'une représentation initiale en une autre représentation. « *Un traitement est une transformation de représentation interne à un registre de représentation* » (Ibid., p. 39). Lors des opérations de traitement, il n'y a donc qu'un seul registre sémiotique mobilisé. L'objectif d'un traitement est l'expansion informationnelle. Dans l'exemple introductif, la détermination de la vitesse (question 3b) est un traitement interne au registre de l'écriture symbolique.
- La conversion est une transformation externe par rapport au registre de la représentation initiale. « La conversion est la transformation de la représentation d'un objet, d'une situation ou d'une information donnée dans un registre en une représentation de ce même objet, de cette même situation ou de la même information dans un autre registre » (Ibid., p. 40.). En reprenant l'exemple introductif, le tracé de la courbe est une conversion du registre de l'écriture symbolique en registre graphique. Duval (1995) indique que « la conversion des

représentations sémiotiques constitue l'activité cognitive la moins spontanée et la plus difficile à acquérir chez la grande majorité des élèves » (Ibid, p. 44)

Ces différentes activités cognitives se combinent en fonction de la tâche demandée aux élèves. Ainsi, pour produire une réponse, les élèves doivent le plus souvent recourir à la formation et au traitement des représentations. Pour les tâches de compréhension, la formation et la conversion, voire également le traitement, seront mobilisés. La compréhension est donc intimement liée au décroisement des registres, de manière à transférer les connaissances dans des situations différentes des situations initiales d'apprentissage. Ainsi, « *l'activité conceptuelle implique la coordination des registres de représentation. Il faut qu'un sujet soit parvenu au stade de la coordination de représentations sémiotiquement hétérogènes, pour qu'il puisse discriminer le représentant et le représenté, ou la représentation et le contenu conceptuel que cette représentation exprime, instancier ou illustrer* » (Ibid., p. 61). Les deux activités, conceptuelles et sémiotiques, ne doivent pas être isolées l'une de l'autre : la compréhension est liée à la reconnaissance de l'invariance d'un objet à travers les différentes représentations mobilisées.

Il serait tentant de croire que les tâches de conversion de registres favorisent leur coordination. Duval rejette cette hypothèse, principalement du fait que les unités signifiantes dans chacun des registres ne sont pas identiques. Avant de convertir une représentation en une autre, le sujet apprenant doit s'approprier un registre de représentation et identifier les unités signifiantes internes à ce registre. C'est seulement ensuite, afin d'ouvrir les possibilités d'apprentissage, qu'il devient possible d'effectuer des conversions de représentation, en évitant les traitements, en tentant de différencier les unités signifiantes dans chacun des registres mobilisés. « *Il faut pouvoir faire explorer toutes les variations possibles d'une représentation dans un registre en faisant prévoir, ou observer, les variations concomitantes de représentations dans l'autre registre* » (Ibid., p. 78). Ainsi, le passage d'un tableau de valeurs à un graphe nécessite l'identification des unités signifiantes dans chacun de ces deux registres :

- le tableau de valeurs est composé d'unités discrètes, pouvant être traitées indépendamment les unes des autres, chacune devant être considérée comme pertinente, signifiante.
- Le graphe est composé d'unités non séparables : tous les points qui le constituent sont pertinents et sont de nouvelles unités signifiantes du registre des graphes. Dans le cas d'un graphe construit à partir de valeurs mesurées, les points correspondant aux valeurs du tableau n'ont pas la même signification que les points constituant la courbe tracée⁴⁸.

Duval décrit cette approche et ses utilisations en lien avec les spécificités des mathématiques, notamment les concepts non accessibles aux sens. Les concepts de la physique ne sont pas plus accessibles au sens que les concepts mathématiques. Ainsi, l'instrument de mesure permet l'objectivation de nos sens quand ceux-ci sont mis à contribution pour une première étude phénoménologique (par exemple, l'instrument de mesure « thermomètre » est nécessaire pour passer de la sensation de froid, de chaud au concept de température par exemple).

L'intérêt des représentations sémiotiques pour les recherches en didactique de la physique est par ailleurs reconnu au niveau international : « *In semiotic terms, representations are constructed from collections of signs. In a discipline such as physics these signs are multimodal representations, examples of which are written and spoken language, gestures, symbols, diagrams, sketches, pictures, simulation and imagery, mathematical formalism and so on [...] In the context of the teaching and learning of a science such as physics, the meaning-making potentials of representations need to be well understood in order for them to be used in optimal ways* » (Linder, 2013, p. 43). Les

⁴⁸ Pour Duval, cela constitue un sérieux problème pour l'utilisation des graphes en physique.

difficultés rencontrées par les élèves à articuler les différents registres sémiotiques nécessaires à la compréhension des phénomènes sont à l'origine de nombreux travaux, particulièrement en chimie : « *This threefold manner of representing chemistry was identified as a main obstacle to learning chemistry, because students often experience difficulties in connecting the different representation modes [...] When teaching, teachers constantly move between multiple representation modes, each time using the one (or a combination) that is most appropriate for the situation. However, learners have difficulties both in understanding the role of the representation that is assumed by the teacher as well as in properly switching between different representations. The ability to use multiple representations for the same concept, and the ability to easily switch from one representation system to another, is essential for successful scientific thinking* » (Rappoport & Ashkenazi, 2008, p. 1585). La multiplicité des représentations sémiotiques à articuler n'est donc pas l'apanage des mathématiques, et les difficultés à s'emparer de ces représentations, à leur donner du sens, à les articuler sont également avérées dans les pratiques d'étude et d'enseignement des sciences physiques.

J'ai donc combiné les registres sémiotiques aux activités de modélisation de manière à analyser les difficultés d'apprentissage et d'enseignement en lien avec les différentes activités cognitives que la sémosis requiert.

3.2.4 Représentations statiques et dynamiques

Le postulat de Duval sur le lien entre représentations matérielles et connaissance rend son approche particulièrement pertinente pour tout chercheur s'intéressant à la manière dont les élèves élaborent du sens aux concepts, plus particulièrement quand ces concepts ne sont accessibles qu'à travers leurs représentations. Son approche est novatrice au sens où peu de travaux croisent les analyses des représentations externes et les représentations mentales (internes) étudiées par la psychologie cognitive (Peraya & Meunier, 1999). Toutefois, elle a pour limite d'étudier principalement les représentations en usage (ou décrites) dans les instructions officielles, les manuels scolaires ou autres documents papier à disposition des enseignants et de leurs élèves (Hitt, 2004). Cela a pour conséquence directe de limiter les représentations sémiotiques à des représentations statiques. Or, les représentations qui peuvent être produites par les élèves en phase d'étude ne sont pas nécessairement conformes aux représentations conventionnelles visées par l'enseignant ou décrites par les ressources traditionnelles et officielles. Ces représentations, parfois non conformes aux représentations conventionnelles peuvent toutefois jouer un rôle dans la compréhension des phénomènes et concepts étudiés.

Pour élargir la panoplie des représentations de contenus, en plus des représentations sémiotiques habituelles « papier-crayon », d'autres canaux de communication, notamment les gestes, sont à examiner. Le geste ne peut être assimilé à un registre sémiotique à lui seul, car il est co-produit avec un autre registre sémiotique, la langue naturelle. Il est donc analysé comme un *mode sémiotique*. Selon Kress & Van Leeuwen (2001) les modes sémiotiques sont des ressources abstraites non-matérielles avec lesquelles nous faisons sens (i.e. l'écriture, la parole, les gestes), alors que les médias sont les outils et les formes matérielles spécifiques par lesquelles ces modes sont portés (i.e. les annotations sur une page, un mouvement du corps, le son de la voix). Les gestes sont des modes sémiotiques généralement peu ou pas étudiés par les recherches sur les représentations externes mobilisées en situations pédagogiques (Ainsworth, 2006 ; de Vries, 2007).

Les représentations dynamiques, portées par des médias comme le corps sont intéressantes à exploiter, non pas dans la phase de conception des activités (il paraît difficile de donner des instructions aux enseignants relatives aux gestes à produire ou de leur donner des grilles de lecture de la gestuelle des élèves) mais dans les phases d'analyse de la mise en œuvre des activités en classe. Outre la possibilité d'articuler ces représentations avec des connaissances préalables non nécessairement conformes au

savoir académique, les gestes sont un moyen pour donner à voir la dynamique du modèle, l'organisation spatiale des objets manipulés... Ces aspects sont difficilement représentables sur les documents papiers ou le tableau blanc, supports utilisés traditionnellement par les enseignants et les élèves. Les analyses que nous avons conduites ont intégré la variété des médias de communication, afin d'étudier la cohérence dans le temps des relations établies entre les différents registres sémiotiques portés par ces médias.

4 Synthèse : modèles, modélisation et registres sémiotiques

4.1 L'apport des modèles et de la modélisation

Tous mes travaux s'appuient sur l'hypothèse que l'étude de la physique ne peut se concevoir sans donner accès au mode d'élaboration des connaissances de cette discipline. Ainsi que je l'ai présenté précédemment, les modèles donnent à discuter la manière dont les savoirs s'élaborent, les choix qui sont opérés, les liens qui existent entre différents points de vue scientifiques sur une même situation. La modélisation est l'opération par laquelle des liens sont établis entre une situation expérimentale et un modèle, de manière à interpréter, prévoir, expliquer les phénomènes étudiés. L'hypothèse que je fais sur le rôle de la modélisation dans l'étude de la physique s'inscrit donc dans la lignée des trois objectifs fixés à l'éducation scientifiques (Hodson, 1992) :

- apprendre les sciences : comprendre les idées qui sont produites par l'activité scientifique, comme les concepts, les modèles et les théories ;
- apprendre sur la science : comprendre les questions en philosophie, histoire et méthodologies des sciences ;
- apprendre comment faire des sciences : être capable de prendre part à une activité qui conduit à la construction de savoirs scientifiques.

Chacun de ces objectifs peut être lu en lien avec le rôle central des modèles : le premier car il est nécessaire de s'appropriier les modèles à développer pour étudier les situations, le deuxième en lien avec l'approche épistémologique que j'ai présentée et définissant les modèles comme des opérateurs sélectifs, à l'articulation entre les lois, principes et les objets, événements étudiés, et le troisième car la modélisation, impliquant le recours à des modèles, est une activité fondatrice de l'élaboration des savoirs scientifiques. L'importance des modèles et de la modélisation est ainsi reconnue dans la recherche en didactique, de manière internationale, comme devant être prise en charge par l'enseignement : « *In the natural sciences, models are developed, used, and revised extensively by scientists [...]. Moreover, modelling is seen as the essence of the dynamic and non-linear processes involved in the development of scientific knowledge. Therefore the achievement of Hodson's goals of a comprehensive understanding of science by the student entails a central role for models and modelling in science education* » (Henze, van Driel & Verloop, 2007, p. 1823).

L'intérêt des modèles et des activités de modélisation pour l'enseignement des sciences est fréquemment mis en avant dans les recherches en didactique. Les arguments avancés sont liés d'une part à la nécessaire compréhension des modes d'élaboration des savoirs scientifiques et d'autre part à la nécessité de prendre du recul sur la validité des productions scientifiques. « *The centrality of models and modelling in the development of scientific knowledge must be transferred to science education if it is assumed that a major purpose of the latter is students' acquisition of comprehensive understanding of the main processes and products of science* »

(Justi & van Driel, 2005, p. 549). Pour autant, il s'avère que les contenus d'enseignement font rarement explicitement référence à ces activités qui donnent de plus à voir la science non pas comme un processus cumulatif de connaissances, mais comme un processus de production et d'amélioration successifs des modèles : « *in different countries, teaching practices rarely include modelling activities and do not emphasize the development of scientific knowledge as a continuous process of producing and revising models.* » (*Ibid.*, p. 550).

Prenant appui sur ce constat, j'ai systématiquement proposé, conjointement avec les autres chercheurs impliqués dans mes projets apparentés à la DBR, de construire des activités pour les élèves dans lesquelles les modèles mobilisés seraient explicités de manière à aider les élèves à articuler les situations étudiées et les modèles scientifiques.

Ainsi, en tant que chercheur j'ai plus particulièrement axé ma contribution dans les projets DBR sur :

- La rédaction des activités et les termes utilisés, le choix des règles de fonctionnement des modèles à donner aux élèves et celles que les élèves doivent ensuite construire ;
- La distinction et l'articulation des différents niveaux de modélisation ; les liens entre les objets et propriétés habituellement mis en œuvre dans vie quotidienne et en physique ;
- L'enchaînement des activités proposées en lien avec les processus d'élaboration des savoirs scientifiques ;
- L'analyse des productions des élèves pour mener à terme les activités proposées ;
- L'analyse des interactions entre enseignants et élèves lors de la réalisation de ces activités.

4.2 L'apport des registres sémiotiques

4.2.1 Communiquer les contenus des modèles

La compréhension de la physique ne peut se concevoir sans outils pour communiquer les savoirs mobilisés : « *the mastery of science is mainly a matter of learning how to talk science* » (Lemke, 1990, p. 153). Pour autant, faire des sciences est bien plus que seulement tenir un discours sur la science. Le langage scientifique doit donner à voir la diversité des activités conduites, dont de nombreuses ne sont pas verbales. Il a ainsi été montré que les élèves avaient des difficultés à s'approprier la langue scientifique qui est caractérisée par Lemke comme un système sémiotique multimodal⁴⁹ : « *science is an integrated description of the natural world in words, symbols, numbers and diagrams. [...] a semiotic system is an interrelated collection of signs or symbols that can be deployed to construct more complex meanings (or at least assemblages of signs to which meanings can be assigned by some system of conventions of use). Each separate semiotic system is a resource for making meanings, and, for historical and physical reasons, these different resources can be combined* » (Lemke, 2012, p. 82). Chaque génération de scientifique va recourir à de nouvelles représentations sémiotiques adaptées aux besoins des théories développées. Ces représentations sémiotiques font l'objet d'enseignements spécifiques (construction de graphe, calculs, tableaux, schémas...). Si l'on souhaite accompagner les élèves dans l'acquisition de connaissances scientifiques, il est nécessaire de comprendre comment aider les élèves à s'approprier et manipuler ces représentations (DiSessa, 2004).

⁴⁹ On trouve fréquemment dans la littérature anglo-saxonne sur l'éducation scientifique le terme multimodalité pour qualifier la diversité des systèmes sémiotiques.

Les travaux de Duval, enrichis de ceux sur les représentations dynamiques, transposés à la physique, permettent de mettre en évidence la diversité des registres à disposition, leurs conversions et d'analyser la manière dont les enseignants les présentent, les élèves les mobilisent, en relation avec les modèles étudiés.

La langue étant un outil pour penser et raisonner en sciences, il est nécessaire que les élèves apprennent à manipuler les outils sémiotiques relatifs aux savoirs scientifiques pour communiquer les observations réalisées et les modèles mis en œuvre (Yeo & Gilbert, 2014). Lorsque l'on choisit un modèle pour étudier une situation, cela implique de sélectionner les éléments que le modèle pourra expliquer ou prévoir. Cette opération de sélection tend à minimiser certains éléments de la situation, voir même en ignorer. Dans le même temps, les interprétations fondées sur les modèles conduisent à ajouter aux représentations des informations non visibles dans la situation, mais qui lui donnent du sens en relation avec les concepts mobilisés : une flèche représentant une force s'exerçant sur un objet, ou le sens du courant électrique dans un circuit, ou le rayon de lumière. Dans chacun de ces exemples, la flèche représentera un concept, une propriété non perceptible et aura un sens particulier en relation avec le modèle choisi. L'articulation entre situation expérimentale et modèle nécessite donc deux opérations qui paraissent contradictoires : omettre des éléments jugés non pertinents par la physique (à un moment donné de l'enseignement) et en ajouter d'autres jusque-là non perceptibles.

Sur la base de ces éléments relatifs aux représentations sémiotiques, j'ai proposé, dans les projets apparentés à la DBR, des activités permettant aux élèves :

- de s'approprier les registres de représentations associés au modèles en explicitant les règles de conformité et en identifiant les unités signifiantes autant que possible ;
- de mettre en parallèle les registres associés aux différents modèles afin d'explicitier les raisons sous-jacentes au choix d'un modèle particulier.
- de fournir des réponses à une même question à l'aide de différents registres de représentation de manière à aider les élèves à voir que certains sont plus pertinents que d'autres pour désigner les objets, les phénomènes, les propriétés, et relations entre les objets ou concepts manipulés.

4.2.2 Parallèle entre les représentations et les modèles

La cohérence du cadre épistémo-sémiotique que je présente dans cette note de synthèse tient à des parallèles entre les activités de modélisation et celles liées aux représentations, les représentations sémiotiques étant au service des activités de modélisation à des fins d'élaboration, de communication, de discussion des modèles pour étudier les situations (Schwarz & al., 2009). Les activités de modélisation tout comme les activités de représentation impliquent en effet de sélectionner des éléments, de séparer le pertinent du non pertinent, de s'approprier des règles de fonctionnement. « *La formation de représentations sémiotiques [...] implique la sélection d'un certain nombre de caractères d'un contenu perçu, imaginé ou déjà représenté en fonction des possibilités de représentations propres au registre choisi* » (Duval, 1995, p. 38).

Si pour De Vries (2007) un modèle est « un contenu qui peut être exprimé à travers différents registres sémiotiques (p. 11), Gilbert affirme plus radicalement que tous les modèles scientifiques incluent des représentations sémiotiques, qu'elles soient des écritures symboliques, des schémas. La description des modèles se fait en langue naturelle. « *Inevitably, a model can include representations both of abstractions and of the material objects on which they act at the same time* » (Gilbert, 2004, p. 117). Ainsi, tout modèle est

communiqué à travers l'utilisation de l'un ou plusieurs des modes de représentation suivants (Gilbert & al., 2000 ; Gilbert, 2004) :

- **Le mode concret.** Ce mode de représentation est tridimensionnel et il implique l'utilisation de matériaux résistants. C'est le mode utilisé pour les représentations du modèle moléculaire par exemple.
- **Le mode verbal.** Ce mode décrit sous forme orale ou écrite les entités représentées, leurs relations. Il peut aussi inclure la description des métaphores et analogies sur lesquelles le modèle repose.
- **Le mode symbolique.** Ce mode comprend les formules chimiques, les équations ou autres expressions mathématiques. Les relations entre grandeurs mesurables ou calculables font notamment appel à ce mode de représentation.
- **Le mode visuel.** Ce mode est celui relatif aux graphes, aux schémas en deux dimensions, aux animations ou aux simulations informatiques.
- **Le mode gestuel.** Ce dernier mode fait appel au corps, ou à des parties du corps. C'est le mode mobilisé lors d'un mime des positions relatives des objets par exemple, de la vitesse d'un objet ou de la direction d'un mouvement ...

Cette description des différents modes n'est pas sans rappeler les registres sémiotiques que j'ai introduits précédemment. Dans la continuité des travaux de Duval, il s'agit de décrire les conversions possibles entre les représentations sémiotiques, ainsi que les différences de sens, du point de vue des modèles mobilisés, que le choix d'un registre sémiotique de représentation implique.

Il existe des liens entre les représentations, les modèles et les situations expérimentales qu'il convient de considérer : « un modèle scientifique [constitue] une représentation d'un champ expérimental du point de vue d'une théorie [...]. On étudie un modèle, la plupart du temps, à l'aide de représentations externes multiples qui sont ainsi des représentations du deuxième ordre du champ expérimental. [...] Par exemple, dans un circuit électrique ou dans une chaîne énergétique – deux modèles d'une pile reliée à une ampoule – le point de vue électrocinétique ou énergétique ne sélectionne ni l'orientation dans l'espace, ni la couleur, ni la marque des composantes. La représentation externe contient à son tour des aspects correspondant à une sélection des aspects du modèle (représentation intrinsèque, extrinsèque) et des aspects non pertinents (représentation artefactuelle) » (De Vries, 2007, p. 95). Ainsi, pour apprendre à manipuler les représentations, il faut aussi apprendre les règles inhérentes au modèle que l'on représente et donc expliciter les éléments de la situation expérimentale qui doivent être sélectionnés (ou au contraire qui ne seront pas étudiés). Le modèle et les représentations associées ne peuvent être dissociés sans perdre le sens des représentations du point de vue de la modélisation adoptée, et le modèle ne peut être mobilisé, communiqué, sans prendre appui sur des représentations. Pour certaines, ces représentations font consensus dans la communauté scientifique ; pour d'autres, il s'agit de créations à des fins d'enseignement.

Le parallèle entre modèle et représentations tient aussi au fait que les critères mobilisés pour leur évaluation sont identiques (de Vries, 2007) : généralité, ajustement aux données, simplicité (parcimonie selon Ainsworth, 2006), cohérence. Si un expert parvient à différencier un modèle de la représentation utilisée pour un problème donné, cela n'est pas forcément le cas pour les élèves. Par exemple, dans le cas de l'enseignement de la chimie, « *although expert chemists switch fluidly among the symbolic, submicroscopic, and macroscopic levels and corresponding representations, students struggle to connect multiple levels and employ representations effectively throughout the chemistry curriculum* » (Stieff, 2011, p. 1138).

Au sein des projets collaboratifs DBR, les aspects liés aux modèles sont articulés aux représentations sémiotiques, que ce soit dans la conception des activités (voir chapitre 5), ou dans les analyses des productions multimodales des enseignants et des élèves (voir chapitre 6).

5 La modélisation et les registres sémiotiques dans le cadre épistémo-sémiotique (CES)

Dans cette partie, je décris la manière dont le CES fut décliné en descripteurs pour décrire les activités des élèves et des enseignants en interaction. Des exemples sont donnés en lien avec les analyses conduites, qui seront présentées plus en détail dans le chapitre 6. Je présente dans un premier temps les descripteurs des niveaux de modélisation mobilisés dans les productions écrites et orales, puis les registres sémiotiques utilisés pour communiquer ces niveaux de modélisation. Dans un dernier temps, j'expose les descripteurs des interactions multimodales en lien avec les activités de modélisation.

5.1 Les niveaux de modélisation pour décrire les productions

Comme je l'ai présenté en introduction, le cadre épistémo-sémiotique que j'ai développé s'inscrit dans la continuité des travaux de Tiberghien et de sa théorie des deux mondes (Tiberghien, 1994 ; Gaidioz & al., 2004 ; Tiberghien & Vince, 2002). De manière à analyser plus finement des activités des élèves en relation avec le type de tâches qu'ils réalisent en classe, ces deux mondes ont été découpés en niveaux de modélisation : le monde des théories et modèles contient le niveau de la théorie, du modèle physique et du modèle mathématique ; le monde des objets et événements inclut le niveau des objets et événements et le niveau de la mesure. Dans cette partie, j'explicité les descripteurs que j'ai élaborés et utilisés pour associer une production d'élève ou d'enseignant à un niveau de modélisation.

5.1.1 Le niveau de la théorie

Le niveau de la théorie fait référence au système explicatif mis en œuvre par les élèves. Ce niveau de la théorie recouvre ainsi les principes, comme le principe de conservation de l'énergie, les paradigmes au sens de Kuhn (1983), les lois, mais également la causalité, qui est un des principes explicatifs souvent utilisés par les élèves (Viennot 1993).

- Béatrice : *Bon alors les interactions se compensent... Analyser ce résultat à l'aide du principe d'inertie...*

5.1.2 Le niveau du modèle physique

Ainsi que je l'ai présenté précédemment (paragraphe 2, p. 62 de ce chapitre) le modèle est un intermédiaire entre la théorie et le champ expérimental donnant à interpréter le monde réel dans les termes de la physique. Lors de l'interprétation ou de la prédiction de faits expérimentaux, par le choix même implicite d'une théorie, l'élève construit un modèle de la situation expérimentale, en sélectionnant les informations qu'il estime pertinentes (Tiberghien 1994).

Le modèle physique est composé des grandeurs physiques, des relations peu à peu établies entre ces grandeurs. Il ne s'agit pas ici d'utiliser des lois qui auraient un statut de théorie, mais bien de chercher à construire des relations entre des grandeurs physiques sélectionnées. Ce niveau contient aussi les représentations symboliques associées aux modèles physiques : le schéma par exemple, mais aussi les graphiques ou les relations algébriques ou numériques entre grandeurs ou valeurs de ces grandeurs, les représentations conventionnelles (symbole U pour la tension, I pour l'intensité), les relations entre unités, etc.

- Cédric : Voilà, mais quand V augmente, eh ben t'as, t'as E_p qui diminue. // Donc, si elle diminue, c'est pas en rapport, en rapport, avec l'expression qu'on a avant.
- Paul : Heure, une heure c'est 3600 secondes ! et 1 watt heure c'est égal à 3600 joules !

Ce niveau est également celui mis en œuvre lorsque les élèves construisent le schéma d'un circuit électrique, d'une chaîne énergétique, de la propagation de la lumière en suivant les règles de schématisation liée au modèle en jeu.

5.1.3 Le niveau du modèle mathématique

Un autre niveau de modélisation mobilisé par les élèves au cours du traitement des données quantitatives est celui du modèle mathématique. Le terme choisi pour qualifier ce niveau est lié aux outils conceptuels qu'il contient, le plus souvent introduits en dans le cadre de l'enseignement de cette discipline, par ailleurs souvent considérée comme discipline outils pour la physique. Par la mobilisation des éléments relevant de ce niveau, les élèves mettent en relation des données numériques ou algébriques, recherchent des invariants ou extrapolent des résultats. Le niveau du modèle mathématique n'est pas lié de manière exclusive à un modèle physique donné. Ainsi, ce niveau contient des éléments numériques sélectionnés et traités dans l'expérience : valeurs des mesures converties dans un autre système d'unités, opérations effectuées sur les valeurs mesurées, calcul de coefficients, dont la caractéristique commune est l'absence d'unité ou de symboles ayant un lien explicite avec les grandeurs physiques en jeu.

- Sarah : Bon, je mets 11,75 ben là tu peux mettre 11,75 et ici 0,89 tu mets six zéro...
- Béatrice : Et puis en ordonnée ça va nous faire euh en abscisse ça va nous faire à peu près dix centimètres. Onze centimètres
- Marine : 140 moins 45 ça fait combien ?

Les interventions relevant de ce niveau sont par exemple liées à la recherche d'un coefficient de proportionnalité, soit à partir des données numériques figurant dans un tableau de mesure, soit à partir d'un graphe (Figure 19). Lors des calculs, ou de l'interprétation des graphes, il est très fréquent de ne plus fait référence explicitement à la signification des nombres manipulés du point de vue des grandeurs physiques. C'est l'une des explications au fait que les élèves ont des difficultés à donner du sens aux résultats de leurs calculs.

La représentation graphique $E = P(t)$ est une droite qui passe par l'origine. Donc la relation correspondant à cette droite est du type $y = ax$.
On obtient une droite donc l'équation est de la forme $E = at$ avec a constant. $a = \frac{E}{t} = \frac{45000}{75} = 600$

Figure 19: deux exemples de productions d'élèves liées au modèle mathématique

5.1.4 Le niveau de la mesure

Le niveau de la mesure est lié au recueil d'informations quantitatives sur les objets et les événements. Du point de vue du scientifique, il a été montré précédemment que ce niveau est lié à celui des modèles. Le point de vue adopté dans mes travaux, en conformité avec les travaux de Tiberghien, vise à analyser le fonctionnement des élèves, pour lesquels le modèle implémenté dans l'instrument de mesure n'est pas accessible en phase d'apprentissage. La mesure est donc, pour les élèves, davantage liée à des éléments observables et donc au monde des objets et événements. Les propositions qui

relèvent du niveau de la mesure mettent en œuvre directement les grandeurs mesurées sur les appareils de mesures ou fournies par le professeur, non modifiées. Les modifications sont par exemple une conversion d'unités, une approximation. Toute modification sera au niveau des modèles physique ou mathématiques en fonction des éléments mobilisés lors des modifications. Les mesures sont lues sur appareil, ou sur papier après avoir été lues sur appareil ou fournies par la consigne distribuée par l'enseignant.

- *Marc : Ben attends euh... 16 degrés... T initial 16. Mmh !*
- *Paul : Top, 45 secondes ! (Marine) : et il est exactement, il fait 18 degrés / Combien le temps, 45 secondes ?*
- *Marine : Ouais, mais non, parce qu'au cours du temps ça varie pas ton intensité et ton voltmètre alors que par exemple la température*

Dans les productions écrites, ce niveau est souvent associé aux tableaux de mesure, ou aux lectures ponctuelles demandées par l'enseignant (Figure 20).

Déclencher le chronomètre au moment du branchement définitif du thermoplongeur, noter la température initiale et présenter les résultats dans le tableau suivant ci-dessous. Noter $U = 0,226$ V et $I = 2,73$ mA.

Figure 20: un exemple de production écrite d'élève liée au niveau de la mesure

5.1.5 Le niveau des objets et les événements

Le niveau des objets et événements contient tous les éléments matériels avec lesquels les élèves vont interagir. Ce niveau, proche du monde des objets et événements selon Tiberghien (1994), comprend les appareils, les objets, les événements sur lesquels l'expérience va porter.

- *Jean : Il va falloir brancher ça !*
- *Marc : Il faut le truc qui tourne là, je ne sais pas comment ça s'appelle.*
- *Marine : Attends, ton ampèremètre il va au thermoplongeur*

5.2 Les registres sémiotiques pour décrire les productions orales et écrites

Les registres sémiotiques mis en œuvre lors des interactions en classe varient en fonction de la situation proposée par l'enseignant, des connaissances des élèves. Dans le cadre des projets « énergie » puis « collège », je me suis limitée aux registres proposés dans les textes des consignes adressés aux élèves et aux registres qui habituellement mis en œuvre dans des activités similaires. Chacun des registres est utilisé pour exprimer des éléments de chacun des niveaux de modélisation présentés au paragraphe précédent. Je donne ci-dessous les définitions de ces registres ainsi que des exemples de mise en œuvre par les élèves, issus des transcriptions des interactions en classe ou des productions écrites recueillies au fil des différents projets. Dans les analyses des productions des élèves (verbales ou non verbales), j'ai veillé à ne pas confondre le signe, unité élémentaire de représentation, et le registre sémiotique, ou système de signe, qui comprend les signes mais aussi l'ensemble des relations qui les unissent pour que les signes combinés acquièrent une signification (D'Amore, 2001). Ainsi, dans mes analyses, je prends soin de ne pas isoler des entités visuelles, ces entités relevant parfois de plusieurs registres.

Après avoir défini chacun des registres, je présente un exemple de mise en œuvre tiré des données analysées, soit dans les interactions verbales, soit dans les productions écrites. A la suite de la

présentation de chacun de ces registres, je montrerai comment ces différents registres sont transformés quand ils traitent d'un même contenu.

5.2.1 Le registre de la langue naturelle⁵⁰

La langue naturelle fait partie des représentations discursives (Duval, 2007), au même titre que l'écriture symbolique⁵¹. Les représentations sont dites discursives lorsque leur organisation interne obéit à des règles syntaxiques. Ce registre est qualifié de « naturel » car c'est celui qui est spontanément mis en œuvre pour décrire une situation sous forme de texte qu'il s'agisse de la consigne ou de la mise en récit l'expérience réalisée des phénomènes qualitatifs observés. « *La langue naturelle constitue un registre à part. Non seulement en raison de sa plus grande complexité et du nombre considérablement élevé de variations qu'elle offre, mais aussi en raison de sa priorité génétique sur les autres registres et de son rôle unique par rapport à la fonction méta-discursive de communication. Cela se traduit, chez tous les individus, par une spontanéité discursive qui sert de point d'ancrage à tout apprentissage lié à un enseignement, indépendamment du fait que cette spontanéité puisse ne pas respecter toutes les règles de conformité de la langue et qu'elle puisse être inhibée ou favorisée par le jeu des interactions sociales* » (Duval, 2005, p. 82). Ce registre exprime également la signification des notions de physique sans avoir recours à des écritures symboliques qui impliquent la reconnaissance d'un modèle scientifique pour la mise en relation formelle des éléments de la situation⁵².

Charles : ...Les forces... la somme n'est pas nulle /, nulle et ça prouve quoi si la force des trucs ... oh ! si la somme des forces extérieures n'est pas nulle, il est pas en translation avec une ligne uniforme c'est ça ?

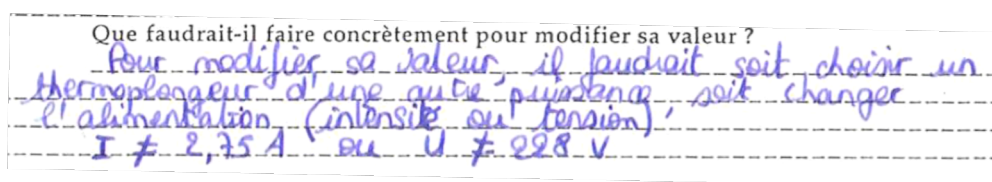


Figure 21: un exemple de production écrite d'élève en langue naturelle⁵³

Dans l'exemple donné de production écrite (Figure 21), on voit que les élèves complètent leur formulation mobilisant le registre de la langue naturelle par une production s'appuyant sur le registre des écritures symboliques (cf paragraphe suivant, 5.2.2). En effet, en physique, si la langue naturelle

⁵⁰ Dans ma thèse, j'avais initialement proposé, en conformité avec les intitulés fréquemment donnés par Duval (1995, p. 21 par exemple, même si, dans l'ensemble son ouvrage, il fait référence indifféremment soit à la langue naturelle soit au langage naturel) le registre « langage naturel », ce que je corrige aujourd'hui pour l'expression « langue naturelle ». En effet, dans la continuité de la distinction terminologique proposée par Saussure, le langage est une faculté humaine de construire des langues pour communiquer, à l'aide d'un système de communication quel qu'il soit. La langue est un système de communication conventionnel particulier. La langue (acquise) est donc la manifestation d'une faculté (innée).

⁵¹ Dans la littérature traitant des registres sémiotiques ou des systèmes de signes mobilisés pour communiquer, le terme langue est associé avec l'adjectif naturelle, et celui d'écriture avec l'adjectif symbolique. Aucun terme ne qualifie les graphes, les dessins, les schémas. Dans la suite de ma présentation, je me conformerai à cet usage, même si on pourrait opérer une distinction entre les registres usuellement mobilisés à l'oral et ceux qui relèvent davantage de l'écrit.

⁵² Une écriture symbolique peut aussi renvoyer à des modèles naïfs lorsque le modèle scientifique n'est pas encore connu ou mal assimilé. C'est par exemple le cas lorsque les élèves opèrent des relations mathématiques entre grandeurs ou des valeurs pour rechercher une éventuelle relation de proportionnalité par exemple.

⁵³ Toutes les productions d'élèves données en exemple sont des données de recherches que j'ai conduites ou que j'ai supervisées.

permet de décrire les phénomènes, sa légitimité par rapport à d'autres registres tels celui des écritures symboliques tend à devenir moindre au fil des niveaux d'enseignement du fait de la demande croissante faite aux élèves de légitimer leurs réponses sur la base des concepts, des lois, des principes...

5.2.2 Le registre des écritures symboliques

Comme son nom l'indique, l'écriture symbolique est un registre qui appartient à la classe des symboles. Duval (2007) classe ce registre dans la classe des représentations discursives. Ce registre permet d'énoncer des relations fonctionnelles entre grandeurs, soit sous forme de symboles numériques, soit sous forme de symboles littéraux, soit en combinant les deux. Ainsi, des grandeurs physiques seront exprimées avec différents types de symboles, autres que ceux autorisés par la langue naturelle qui est une forme complexe de codage de l'information.

- Béatrice : *C'était 0,5 et euh 0,5 ça fait 0,1 euh attends 5 divisé par 4 ça fait 1,25*
- Sarah : $P=Mg$

Dans ces deux exemple, j'ai fait le choix d'écrire sous forme d'écriture symbolique des expressions qui auraient aussi pu être transcrites sous forme de langue naturelle, soit pour Béatrice « *C'était zéro virgule cinq ça fait zéro virgule un euh attends cinq divisé par quatre ça fait un virgule vingt cinq* » et pour Sarah « *p égale m g* ». Je justifie mon choix au regard de ce que je pense être la représentation la plus facile à manipuler pour les élèves, en termes de coût de mémoire, à ce niveau d'enseignement (première S).

Ce registre est celui qui sera mobilisé par exemple pour l'inscription des valeurs dans les tableaux de mesure ou dans l'établissement de relations entre grandeurs. Je prends ici le parti de dissocier le tableau de mesure du graphe que ce tableau permettrait de construire, me distanciant ainsi de la sémiologie graphique de Bertin (1967). De formation géographe et cartographe, Bertin cherche à définir une théorie, la graphique, indépendante de tout champ d'application et qui « *utilise les propriétés de l'image visuelle pour faire apparaître les relations de ressemblance et d'ordre entre des données. La graphique part d'un ensemble préalablement défini : un tableau de données [...]. La graphique, outil de travail, a pour but de transcrire des relations entre des ensembles préalablement définis par le tableau des données, et suit des règles précises. La transcription de la relation est sans ambiguïté* » (Bianchin, 2012, p. 15-16). Dans la graphique, il y a une stricte correspondance entre les tableaux de données et leur représentation (graphisme), établie préalablement par des lois (De Vries, 2007). Dans les situations que j'ai étudiées, le tableau de valeurs pouvait être étudié indépendamment de toute représentation graphique, d'où le choix de ne pas établir de relation *a priori* entre ces deux représentations. Ce choix est également celui opéré par Duval (2007, p. 13) dans sa classification des différentes représentations rendant accessible les propriétés d'une fonction linéaire.

n (tours)	E (Wh)	E (J)	t (min et s)	t (s)	θ (°C)
0	0	0	0	0	$\theta_0 = 29$
1	2,5	9000	18s	18	
2	5	18000	32s	32	
3	7,5	27000	46s	46	
4	10	36000	1min	60	
5	12,5	45000	1min 15s	75	
6	15	54000	1min 29s	89	
7	17,5	63000	1min 43s	103	
8	20	72000	1min 58s	118	
9	22,5	81000	2min 12s	132	
10	25	90000	2min 26s	146	$\theta_{fin} = 34$

D'où $E = 600 \times t$.

Figure 22: exemple de productions d'élèves en écriture symbolique: un tableau de mesures et une relation entre deux grandeurs

Dans la réponse produite par le groupe d'élèves en Figure 22 sur la relation entre l'énergie et le temps (il s'agit de déterminer une valeur constante qui est la puissance de l'appareil utilisé), la relation entre grandeurs s'appuie sur le registre des écritures symboliques numériques (600) et littérales (utilisation des lettres E et t).

5.2.3 Le registre des graphes

Contrairement aux registres précédents, ce registre est qualifié de représentation non-discursive⁵⁴. Ces représentations utilisent des propriétés d'organisation propres aux organisations spatiales (Duval, 2007). Ce registre permet de représenter des relations fonctionnelles entre des grandeurs en les organisant dans un espace déterminé et en obéissant à des règles de codage. Dans les transcriptions des interactions verbales, les descriptions des graphes se font en langue naturelle ou écriture symbolique. Il est toutefois envisageable d'associer des verbalisations à ce registre quand les contenus propositionnels font référence à la lecture, la description, la désignation des graphes, en mobilisant des termes propres aux graphes.

Sophie : pas tout à fait une droite on a que trois points là

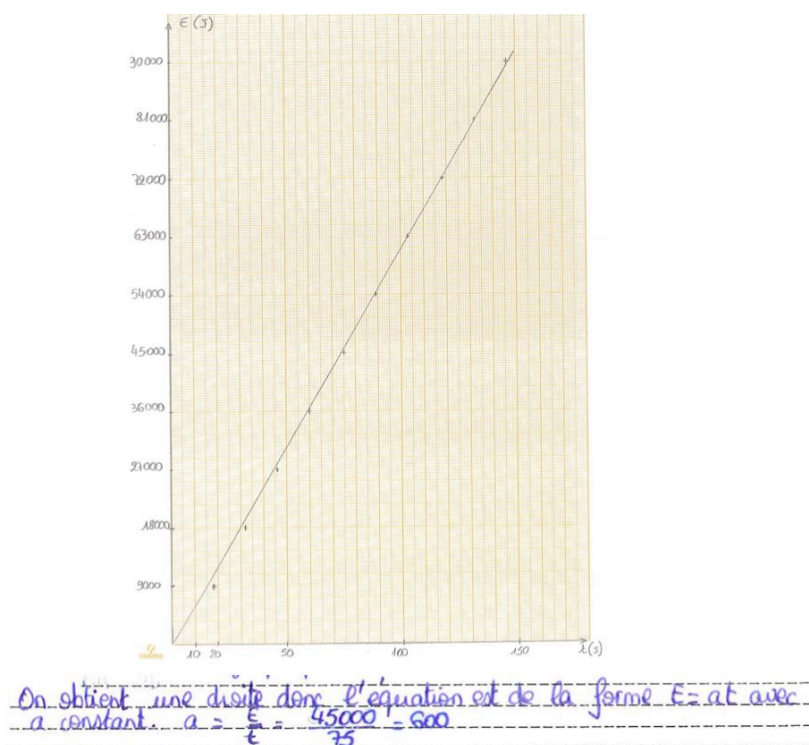


Figure 23 : exemple de production d'élève mobilisant le registre des graphes (graphisme), et description associée (langue naturelle et écritures symboliques)

Les productions écrites des élèves (Figure 23), associées à ce registre seront soit un graphe effectivement construit, soit une description associée qui articulent d'autres registres comme la langue naturelle et les écritures symboliques. L'exemple de graphe proposé en Figure 23, associé aux transcriptions des échanges entre les élèves, montre que les points dessinés (sur la base du tableau de

⁵⁴ Duval (2007) précise ne pas utiliser volontairement le terme « image » au profit de représentation non-discursives. En effet, les images sont des représentations qui ne sont pas sémiotiques (par exemple une photographie). Les représentations non-discursives sont des représentations sémiotiques, telles que les figures géométriques, les schémas, les graphes...

mesures) ou désignés dans le discours, sont souvent différents de ceux constituant la droite tracée. En effet, cette droite représente une modélisation de la situation, à savoir la relation entre l'énergie et le temps, non encore accessible aux élèves. On notera également que dans le calcul du coefficient directeur de la droite, les élèves ne donnent pas d'unités, ce qui est un indice d'un traitement des données au niveau du modèle mathématique.

5.2.4 Le registre des schémas

Les schémas ont été analysés sous des appellations variées selon les auteurs et sont fréquemment positionnés dans la même catégorie que les diagrammes (De Vries, 2007). Ils sont parfois assimilés à des icônes au sens de Pierce du fait qu'ils présentent une certaine ressemblance avec l'objet. Il ne s'agit toutefois pas que le schéma soit une copie conforme de l'objet, mais qu'il lui ressemble tout en présentant un caractère de généralité par rapport à la situation étudiée. « *L'apprentissage du schéma peut donc permettre de parvenir à un certain niveau de généralité, d'appréhender les relations ou les caractéristiques pertinentes d'une ou plusieurs classes d'objets* » (Vezin, 1972, p. 193). Selon De Vries (2007), il faut distinguer plusieurs types de schémas (qu'elle nomme représentations scientifiques). Les représentations de référence sont celles qui ont été largement adoptées par la communauté scientifique. Ainsi, les schémas électriques sont des représentations de référence. Ces représentations peuvent être adaptées, modifiées par l'enseignant lorsqu'il les présente aux élèves de manière à simplifier ces représentations, ou à mettre en exergue un caractère saillant (reconnu comme pertinent) de la situation représentée.

Dans la Figure 24, je reproduis des schémas électriques issus de deux manuels scolaires de cinquième, les schémas ayant ici pour objectif de visualiser les différences de luminosité en fonction des types de circuit. Les deux manuels font figurer, par des jaunes plus ou moins intenses dans les symboles de la lampe, associés avec des traits autour du symbole de la lampe pour le manuel Hatier, l'intensité du rayonnement en fonction du nombre de lampes et du type de branchement dans le circuit⁵⁵.

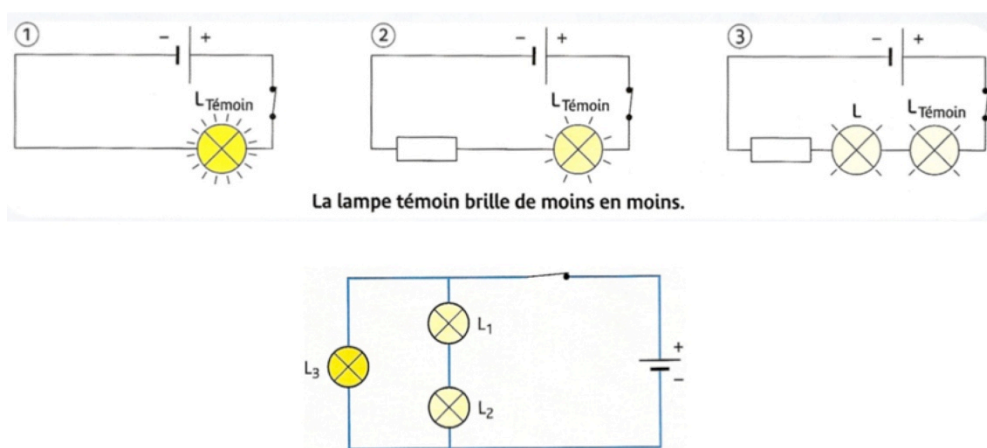


Figure 24: exemples de schémas de circuits électriques adaptés à des fins d'enseignement (en haut, schémas extraits du manuel Hatier, 2006, p. 149 ; en bas, schéma extrait du manuel Bordas, 2006, p. 137)

Lorsque les représentations normalisées sous forme de schéma sont intégrées à des outils informatiques utilisés, leur modification est parfois liée à une volonté d'animer les représentations de manière à

⁵⁵ Si ce type de représentation, adaptant des schémas conventionnels est proposé à des fins d'aide à la compréhension, il s'avère qu'en fait il fusionne deux niveaux de modélisation : le niveau du modèle (représenté par le schéma normalisé) et celui des objets et événement (par les niveaux de jaunes et/ou les traits). Dans la présentation des résultats en chapitre 6, je discuterai de ces fusions entre niveaux de modélisation.

expliciter les mécanismes dynamiques. Elles sont alors qualifiées de représentations éducatives, et mêlent des conventions scientifiques à des conventions spécifiques aux situations d'étude. Enfin, certains schémas sont créés à des fins d'enseignement (il s'agit alors de représentations scolaires), comme c'est le cas pour les chaînes énergétiques. Les schémas répondent à des conventions liant trois pôles: « le représenté-modélisé y et le représentant modélisant x et le point de vue a . D'abord les schémas peuvent être caractérisés par ce qui est représenté (y), il peut s'agir d'aspects fonctionnels, temporels, structurels, géométriques, topologiques, etc. Ensuite, on note ce qui représente (x) ; il s'agit ici d'éléments graphiques et alphanumériques localisés dans le plan. Le couplage entre aspects représentants et aspects représentés est assuré par le point de vue (a), par la théorie qui guide le découpage du réel » (De Vries, 2007, p. 73-74). Le schéma est donc fortement contraint par la théorie qui justifie la relation qu'il entretient avec le réel. Sa fonction est de désigner les informations pertinentes dans une situation, en explicitant les relations qu'elles entretiennent.

Bien souvent en physique, le schéma vise à représenter le fonctionnement d'un système étudié et donc sélectionne certaines propriétés physiques de la situation expérimentale. « Le schéma figuratif est une représentation figurée d'une connaissance utilisant formes, dimensions et positions pour ne reproduire que les caractéristiques valables pour une catégorie d'objets ou de phénomènes » (Vezin, 1986, p. 71). Cette sélection de l'information à représenter, en fonction des connaissances en jeu est révélatrice de l'articulation existant entre le modèle, conceptuel abstrait, et sa partie ostensive présente dans les schémas. « Le schéma a , de par sa valeur de généralité, une fonction de sélection de l'information correspondant à un besoin de distinguer, dans le texte et dans les dessins illustratifs, les informations clefs autour desquelles s'organisent des informations moins générales (exemples) ou plus secondaires (annexes) » (Ibid., p. 73). De même que pour le registre des graphes, les transcriptions des interactions ne permettent pas de mobiliser le registre des schémas proprement dit. Il est par contre possible d'associer à ce registre les descriptions, désignations ou lectures des schémas qui ont été recueillis lors des prises de données audio et vidéo.

Paul : Ben non, moi je l'aurai fait figurer là hein ! sur la chaîne... figurer sur la chaîne comme cela a été fait...

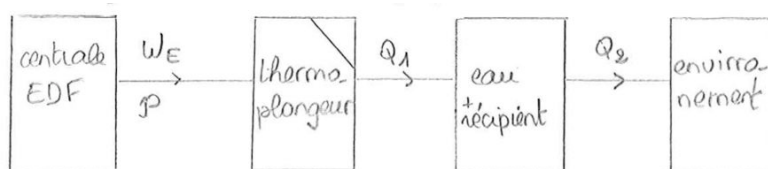


Figure 25: exemple n°1 de schéma de la chaîne énergétique construite par des élèves et désignée dans la transcription

Dans l'exemple du schéma construit par les élèves de la chaîne énergétique (Figure 25) le modèle à mobiliser a incité les élèves à découper la situation étudiée pour déterminer les unités signifiantes dans le registre « schéma », qui dans ce cas est une représentation scolaire : les réservoirs (centrale EDF, eau + récipient et environnement représentés par des rectangles), le transformateur d'énergie (thermoplongeur sous forme de rectangle barré) et à négliger certains autres éléments (comme l'environnement dans la chaîne construite par les élèves en Figure 26).

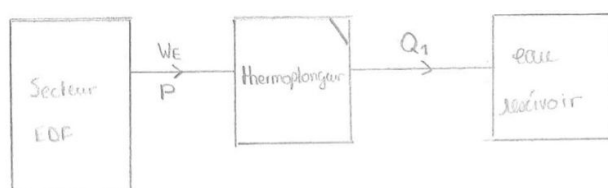


Figure 26: exemple n°2 de schéma de chaîne énergétique construite par des élèves

Dans ces schémas, les flèches représentent les transferts d'énergie qui ne sont pas tous perceptibles. Il aurait été envisageable de demander aux élèves de produire un schéma électrique de la situation, ce qui les aurait conduit à sélectionner d'autres éléments de la situation (fils de connexion) et à attribuer aux éléments sélectionnés une autre signification (le thermoplongeur est alors une résistance et non un transformateur d'énergie). Les élèves ont également représenté la puissance P sur la flèche entre les rectangles représentant la centrale EDF et le thermoplongeur.

5.2.5 Dessin

Ce registre de représentation n'est pas tout à fait identique au registre schéma présenté au paragraphe précédent. Envisagé comme une représentation relativement fidèle de la réalité observée ne faisant pas référence à un modèle spécifique, le dessin est souvent associé à de nombreux présupposés : « *un dessin est compréhensible par tout un chacun, indépendamment de sa langue ; un dessin est compris plus vite et plus facilement que du texte, car il parle directement à la vision, sans l'intermédiaire des mots ; un dessin donne à voir directement la chose dont on veut parler* » (Bordon & Vaillant, 2001, p. 57). Or, il est bien le résultat d'une interprétation de la situation, et donc ne figurent sur le dessin des élèves que les éléments sélectionnés comme pertinents compte tenu des connaissances de l'élève à ce moment ou de ce qu'il estime devoir être présenté comme élément important pour permettre sa compréhension. Ce registre de représentation sémiotique pourrait être considéré comme un schéma implémentant les connaissances préalables des élèves, avec toutefois des unités signifiantes non stabilisées (les élèves ne sélectionnent pas toujours ni ne représentent les mêmes éléments de la situation). De ce fait, ce registre de représentation n'a été analysé que dans les projets collège, du fait qu'il n'a été mobilisé que lorsque les élèves n'avaient pas encore à disposition un modèle physique, avec des représentations associées, pour expliquer ou prédire les événements. Ce registre « dessin » a été utilisé soit pour proposer des protocoles expérimentaux (en lieu et place d'une description en langue naturelle ou en association avec la langue naturelle, Figure 27), ou pour garder une trace des observations.



Figure 27: dessin de proposition d'expérience pour faire briller une lampe avec une pile.

Sur la Figure 28, les dessins d'observations réalisés étaient conservés dans les cahiers des élèves, car il s'agissait à terme de montrer que ce qu'ils pensent avoir observé n'est pas ce qu'ils ont effectivement vu. Outre les différences de couleurs (mais cela est parfois simplement lié au matériel à disposition au moment où les élèves produisent ces dessins), c'est l'organisation spatiale des raies et leur séparation qui vont ensuite être discutées au regard du spectre réel de la lumière blanche naturelle.

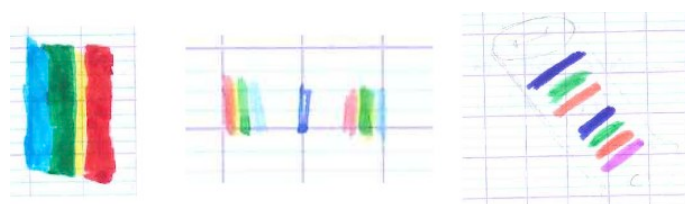


Figure 28: trois dessins d'élèves représentant l'observation faite de la lumière blanche naturelle à l'aide d'un spectroscop

Dans les dessins produits dans le cadre de la séquence d'électrocinétique, comme sur la Figure 29, certains des objets manipulés vont être représentés fidèlement par les élèves (la marque des piles utilisés, la forme de la pile et de la lampe, la lumière émise par la lampe, le fait d'utiliser ou non un support pour la pile, des pinces crocodiles), d'autres seront normalisés (la pile, la lampe, la forme du circuit), et enfin certains seront pointés comme indispensables au bon fonctionnement du circuit (circuit fermé, connections entre les dipôles, ordre des dipôles).

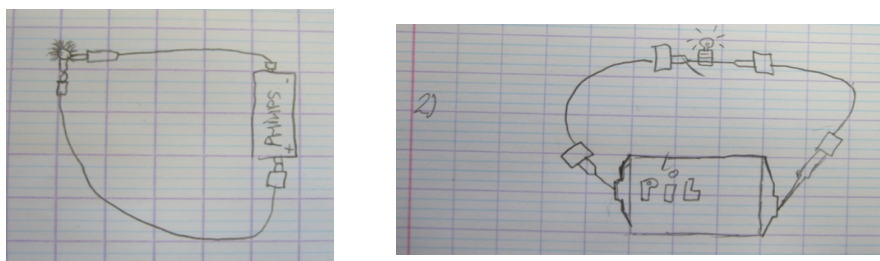


Figure 29: dessins d'élèves indiquant comment brancher la pile à la lampe pour qu'elle brille: à gauche, les élèves indiquent le nom de la pile, à droite, les élèves précisent les points de connexions entre les fils et les dipôles.

5.2.6 Transformation et conversion de registres

Les exemples, présentés en illustration de chacun des registres, indiquent qu'il est possible d'exprimer un contenu similaire, ou des contenus proches à travers des registres sémiotiques différents. La relation entre l'énergie et le temps est ainsi exprimée dans les figures Figure 22, Figure 23, Figure 25) à partir de trois registres parfois articulés spontanément par les élèves (Figure 21) : l'écriture symbolique, le graphe, le schéma et la langue naturelle. La mobilisation de ces registres et leur articulation dépend des tâches proposées. D'autres registres peuvent être sollicités selon les situations étudiées.

5.3 Les interactions multimodales

5.3.1 Joindre le geste à la parole

Lors d'interactions, d'autres canaux de communication que la parole sont mis en œuvre. Le geste, le regard, les postures, les mimiques sont autant de modalités qui véhiculent de l'information. Le statut de ces éléments est souvent resté marginal dans les études en sciences du langage comme en sciences de l'éducation. Deux sources de difficultés expliquent cette mise à l'écart : les problèmes techniques liés au recours à la vidéo, pas toujours évident à mettre en œuvre efficacement dans des situations complexes telles que les interactions en classe, et les problèmes techniques liés à la définition des observables (Cosnier, 1996). En effet, si les unités verbales sont faciles à définir et à transcrire, le cotexte, éléments non verbaux intégrés à l'énoncé total⁵⁶, et notamment les gestes sont beaucoup plus difficiles à transcrire. L'un des plus gros obstacles réside dans la différenciation d'un geste-mouvement d'un geste-signifiant.

Afin de différencier ces deux types de gestes et d'analyser les gestes dans ce qu'ils apportent comme valeur sémiotique, Mc Neill (1992) propose de différencier les mouvements visibles selon qu'ils sont des

⁵⁶ L'énoncé total étant composé, dans un postulat de communication multicanal, des énoncés verbaux et non-verbaux considérés comme synergiques (Cosnier & Vaysse, 1997). « Cette position a une conséquence: on ne peut y séparer arbitrairement l'étude de la chaîne kinésique de ses liens avec la chaîne verbale : il n'existe pas une "langue des gestes" qui serait parallèle à une langue verbale, mais une composante gestuelle du langage » (Ibid., p. 8).

gestes ou des « non-gestes » pour analyser ensuite uniquement les premiers qui accompagnent nécessairement le discours. Ceux qu'il qualifie de « non geste » sont des gestes autoportés (se toucher les cheveux par exemple) ou les manipulations d'objets. Il catégorise ensuite les gestes en quatre catégories :

- Les gestes iconiques, qui entretiennent des relations formelles étroites avec le contenu sémantique du discours. « To judge this or any other gesture iconic, we compare it to our knowledge of the scene, not just to the speech. Speech is necessary inasmuch as we rely on the spoken text to know which scene the speaker is describing, but the iconicity of the gesture is determined by whether it exhibits aspects of the same scene described in speech, not the speech itself » (Ibid., p. 79). Ces gestes peuvent donc refléter des aspects de la situation qui ne sont pas pris en charge par la parole.
- Les gestes métaphoriques, qui sont similaires aux gestes iconiques, à la différence près qu'ils représentent des concepts abstraits comme par exemple des connaissances sur la langue. Par exemple, on pointe le doigt dans le creux de sa main pour indiquer qu'il faut revenir à la question de départ.
- Les gestes déictiques qui sont des mouvements pour désigner un objet, une personne, un lieu... Ces gestes sont classiquement effectués avec l'index, mais tout objet prolongeant le corps peut remplir cette fonction, ainsi que toute partie du corps (montrer avec le menton par exemple).
- Les battements qui ne sont pas porteurs d'une signification particulière relative à un contenu et mais qui peuvent servir à indiquer la vitesse, la répétition, un changement de direction...

Les gestes en tant que ressources sémiotiques n'ont pas été étudiés au cours du projet « énergie ». Lors des projets « Collège », les méthodologies mobilisées pour collecter et analyser les interactions en classe ont bénéficié des progrès techniques concernant l'enregistrement, le visionnage et le traitement des vidéos. La technologie a ainsi contribué à analyser la complexité des interactions en classe, associer les actions conduites par les élèves à celles de l'enseignant et aider à l'identification des gestes porteurs de sens du point de vue des contenus en jeu. Les gestes n'ont donc pas été analysés indépendamment, mais toujours en association avec le discours. Dans les analyses, les quatre catégories de gestes de Mc Neill ont été considérées comme un mode sémiotique (une autre forme de ressource sémiotique que les registres sémiotiques initialement introduits par Duval) pour communiquer, structurer l'information.

5.3.2 Des systèmes aux faisceaux sémiotiques

En combinant le geste et la parole, il ne s'agit pas d'analyser les interactions sous l'angle des modalités de productions des signes. Cela reviendrait à considérer que des contenus se rapportant à un même objet et présentés par des modalités sensorielles comme ayant la même signification. Or, parce qu'ellesinstancient d'une manière particulière les propriétés des objets, les modalités de communication influencent le sens attribué aux objets (Peraya & Meunier, 1999). Selon Kress & Van Leeuwen, (2001), les modes sémiotiques sont des ressources abstraites non-matérielles avec lesquelles nous faisons sens. Les modes sémiotiques les plus courants sont l'écriture, la parole, les images, les gestes. Ces modes sémiotiques sont portés par des média, c'est à dire des formes matérielles comme les annotations sur une page, un mouvement du corps, le son de la voix. Arzarello (2006), élargit la notion de représentations sémiotiques de Duval et introduit la notion de faisceau sémiotique en tenant compte des modes de production des signes. Un faisceau sémiotique se définit comme :

- a. un regroupement d'ensembles sémiotiques (par exemple : paroles + gestes, paroles + gestes + dessins, etc.), composés de modes sémiotiques permettant la production des signes ;

- b. des relations entre les ensembles sémiotiques (par exemple des actions réalisées pour produire et éventuellement transformer ces ensembles).

Il s'agit d'une structure dynamique qui évolue en fonction des activités sémiotiques du sujet et des relations qu'il entretient avec les ressources à sa disposition (Arzarello & Paola, 2007 ; Arzarello & al., 2009) . Dans notre cas, différents ensembles sémiotiques peuvent être mobilisés. Ils sont issus soit du document décrivant l'analogie (ce document comporte des dessins, des textes, des schémas relatifs à l'électricité, l'énergie ou leurs analogues) soit des paroles et gestes de l'enseignante et des élèves. Ces différents ensembles, les modes qui les portent ainsi que les relations entre ces ensembles constituent le faisceau sémiotique en construction. L'ensemble des modes sémiotiques, y compris les gestes, est analysé conjointement à la parole (Kendon, 2004). En effet, les gestes ne sont pas produits seuls mais associés à la parole « *gestures are ubiquitous whenever speakers express ideas in spoken words* » (Alibali & Nathan, 2012, p. 3).

De par sa nature dynamique, le faisceau sémiotique des élèves évolue. La Figure 30 illustre les premiers éléments d'un faisceau sémiotique en cours de construction : les élèves ont manipulé du matériel pour allumer une lampe, puis ont dessiné leur manipulation. On constate que la correspondance terme à terme des éléments manipulés, puis dessinés n'est pas encore complètement établie (les fils ne sont pas représentés, il manque un conducteur entre la borne moins de la pile et la vis de la lampe. Les élèves dessinent par ailleurs de nombreux détails inutiles).

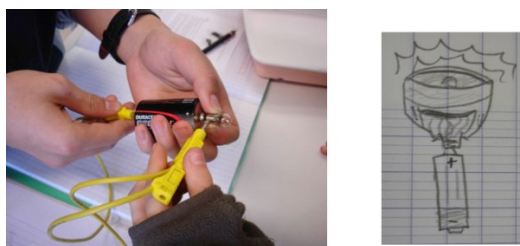


Figure 30: premiers éléments du faisceau sémiotique construit par les élèves en début d'enseignement de l'électrocinétique: gestes pour allumer une lampe et dessin associé.

Au fur et à mesure, le faisceau sémiotique va se compléter avec l'ajout d'autres représentations pour aboutir, dans le cas présenté, à la schématisation du circuit, conforme au modèle de l'électrocinétique. A terme, le faisceau sémiotique permettra une correspondance plus évidente entre les différents registres, les élèves ayant identifié les différentes unités significantes dans chacun des registres de représentations sémiotiques Figure 31).

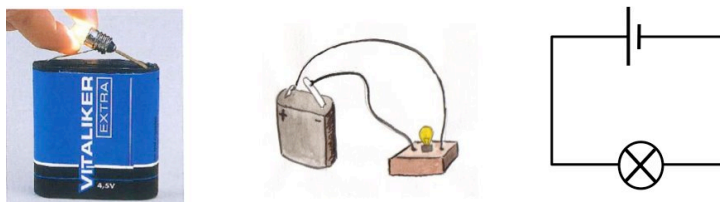


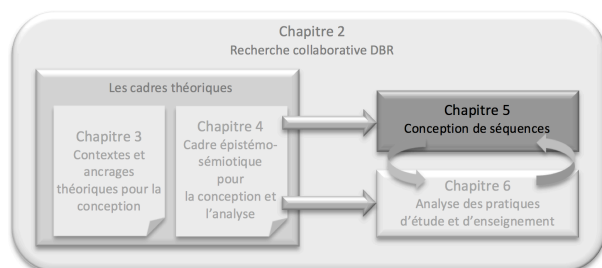
Figure 31 : faisceau sémiotique ciblé par l'enseignement : un minimum de gestes est requis pour allumer la lampe⁵⁷, le dessin fait apparaître les éléments essentiels, et le schéma permet d'expliquer le fonctionnement d'un circuit électrique simple.

⁵⁷ La photo de la manipulation est tirée du manuel « physique chimie cinquième », éditions Didier, 2006, p. 104.

Dans les exemples donnés, les gestes liés à la manipulation d'objets sont considérés comme des représentations sémiotiques. En effet, tous les gestes ne contribuent pas à l'obtention du résultat escompté, et lorsqu'ils permettent d'obtenir un résultat (ici, la lampe qui brille), je considère qu'ils sont porteurs de sens, au même titre que les dessins figurant les manipulations réalisées.

- Chapitre 5 -

Le CÉS dans la conception de séquences d'enseignement



Ce chapitre illustre, sur la base de quelques exemples, comment le cadre épistémologique a été utilisé pour concevoir des séances d'enseignement dans le contexte de recherches collaboratives. Ces exemples ont été sélectionnés de manière à mettre en évidence comment la modélisation, les registres sémiotiques sont mobilisés en fonction des contenus et des niveaux d'enseignement. Cette présentation précise les contenus des séances de physique analysées à l'aide de ce même cadre épistémologique. Les résultats des analyses sont exposés dans le chapitre suivant.

1 Mobilisation du CÉS pour la conception de séquences dans le cadre des projets « collège »

1.1 Les modèles et la modélisation en électricité

Même s'il est essentiel de recourir à un modèle pour expliquer, interpréter ou prédire les phénomènes étudiés, il s'avère qu'il n'est pas toujours prévu par les programmes officiels de fournir de tels systèmes explicatifs aux élèves. Or, en l'absence de modèle, même simplifié, les élèves ont fréquemment recours à des explications relatives à des théories naïves ou conceptions, largement étudiées en didactique des sciences (Tiberghien & al., 2002). Ces conceptions sont, selon les auteurs, constituées d'idées primitives associées en fonction de la situation (DiSessa & Sherin, 1998) ou organisées en systèmes cohérents non obligatoirement conformes au savoir académique (Chi & al., 1994 ; Dykstra & al., 1992 ; Vosniadou, 1994).

Dans le cadre du projet collège, le premier thème traité par le groupe collaboratif DBR, concernait l'électricité en classe de cinquième. Dans les instructions officielles, il n'est pas prévu de donner aux élèves des outils pour différencier les interprétations en termes de courant électrique et d'énergie. Or cette confusion entre ces deux formes d'interprétation, renforcée par les termes mobilisés dans la vie quotidienne (Duit & von Rhöneck, 1998) est à l'origine de nombreuses difficultés des élèves et cette confusion résiste aux enseignements qui ne l'abordent pas explicitement (Shipstone & al., 1988, Tiberghien & al., 1995). Outre ces résultats de la recherche en didactique, le groupe collaboratif DBR s'est entendu pour proposer aux élèves un modèle explicatif, fondé sur une analogie, pour expliquer la circulation du courant dans un circuit et différenciant les interprétations en termes d'énergie et d'électricité. Dans ce cas, le recours à un tel outil a été simultanément reconnu par les deux types d'acteurs au sein du projet.

Effectivement, face aux difficultés des élèves à expliquer les phénomènes électriques, dont seuls les effets sont perceptibles, les enseignants de sciences physiques font très fréquemment le choix d'introduire une analogie, le plus souvent pour matérialiser la circulation du courant voire même pour distinguer tension et intensité⁵⁸. En conséquence de ce recours fréquent aux analogies dans ce domaine de la physique, les analogues au circuit électrique ont été largement discutés dans la communauté de didactique de la physique (Dupin & Johsua, 1989 ; Johsua & Dupin, 1989 ; Scott & al., 2006). Les discussions ont porté sur les relations entre grandeurs dans les analogues, la validité des analogies, la prise en charge des conceptions initiales ou le renforcement de certaines d'entre elles. La revue de littérature réalisée par Mulhall et al. (2001) indique que les choix opérés concernant ces analogies ne font pas consensus dans la communauté.

Même si le recours aux analogies pour enseigner l'électricité est fréquent, il ne doit pas être envisagé systématiquement comme une aide pour les élèves. En effet, en amont de l'utilisation de l'analogie, il est impératif que les élèves se soient construit une représentation de l'objet d'apprentissage, ici, les circuits électriques. Une analogie suppose la définition de deux domaines : le domaine cible, où l'élève est novice et hésitant, et le domaine de référence, plus familier à l'élève, qui va permettre la résolution de problèmes par une mise en parallèle des deux domaines (Cauzinille-Marmèche & al., 1985). La facilité avec laquelle l'élève va passer d'un domaine à l'autre dépend non pas des contenus mais des similitudes de structures existant entre ces représentations (Sander, 2000). L'analogie est une aide pour l'élève s'il est capable de faire le lien entre les deux domaines et si l'analogie préserve la structure des domaines. L'analogie sera dans ce cas une méthode heuristique de résolution de problèmes à mettre en œuvre dans une situation donnée. Si une analogie a l'avantage de simplifier des phénomènes complexes, elle a aussi l'inconvénient de fournir des résultats erronés lorsqu'elle est utilisée hors de son domaine de validité.

Ne souhaitant pas faire de l'analogie développée au sein du projet un outil pérenne, je me suis appuyée sur une analogie existante, initialement proposée par une équipe anglaise (Hind & al., 2002 ; Scott & al., 2006), s'inspirant de l'analogie modélisante proposée par Joshua et Dupin (1989). Cette analogie vise initialement la seule distinction entre le courant électrique (sans que ce courant soit caractérisé par des grandeurs physiques) et l'énergie. L'analogie modélisante « *doit permettre d'introduire dans le domaine-cible une idée nouvelle, dans une forme concrète. Elle sera utilisée pour son rôle heuristique d'image, de métaphore. Le domaine de référence doit être moins complexe (ou en tout cas plus familier) que le domaine-cible, pour que le sujet accepte aisément d'y travailler* » (Dupin & Johsua, 1994, p. 11-12). Ainsi, l'analogie développée se devait de répondre aux contraintes suivantes (Paatz & al., 2004) :

- un isomorphisme fort entre domaine de référence (circuit des camionnettes) et domaine cible (circuit électrique). La similitude entre les deux analogues doit être une similitude de structure, c'est à dire induisant une structure de solution identique dans les deux domaines ;

⁵⁸ Parmi les analogies utilisées pour enseigner l'électrocinétique : analogie hydraulique, analogie du train, analogie de la chaîne de vélo, analogie du télésiège et des skieurs etc. Toutes ces analogies ont des limites, certaines d'entre elles renforçant même des conceptions erronées, comme l'analogie hydraulique qui conforte les élèves dans un raisonnement séquentiel, les modifications faites en aval n'ayant pas de répercussion sur le fonctionnement de la rivière en amont (débit identique de la source). En conséquence, un dipôle situé « plus loin » dans le circuit n'a pas d'influence sur le circuit. Ce genre d'analogie n'est donc qu'une aide apparente à l'élève, mais en fait le conforte dans des schémas explicatifs qui l'handicapent. A la suite de ces critiques, des améliorations (Koumaras, 2003) lui ont été apportées en donnant notamment une dimension plus dynamique, et faisant apparaître la notion fondamentale d'énergie. Cette analogie repose sur un montage complexe et relativement cher, et qui a en plus l'inconvénient de nécessiter des mesures quantitatives avec des Joulemètres, ce qui implique des connaissances bien au-delà du programme officiel de la classe de cinquième.

- une analogie qui lutte contre les conceptions classiques des élèves ;
- une analogie peu coûteuse à mettre en œuvre dans des situations variées, utilisant des connaissances connues des élèves dans le domaine de référence.

En lien avec la présentation des modèles du point de vue épistémologique, une analogie, assimilable à un modèle matérialisé, présente des avantages : elle permet de s'appuyer sur les aspects « matériels » des modèles (Walliser, 1977), offrant ainsi l'opportunité d'une manipulation par les élèves, et évite le recours à des formules mathématiques masquant le sens des grandeurs physiques mises en relation. L'avantage des modèles matériels, éloignés de ce qu'ils représentent, est qu'ils évitent la confusion entre ces deux niveaux de traitement de l'information. En conséquence, ils constituent une aide à la distinction des niveaux du monde réel et des modèles.

Le travail avec les enseignants a consisté dans un premier temps à adapter l'analogie de l'équipe anglaise aux contraintes et besoins de l'enseignement de l'électricité au programme français de cinquième (Bécu-Robinault & al., 2006a). Cette analogie met en œuvre un domaine de référence aisément compréhensible par les élèves, à savoir un circuit de camionnettes livrant du pain fourni par une boulangerie à des supermarchés (Figure 32). Le circuit simple dans lequel une pile est connectée à une lampe est analogue à un circuit de camionnettes reliant une boulangerie à un supermarché.

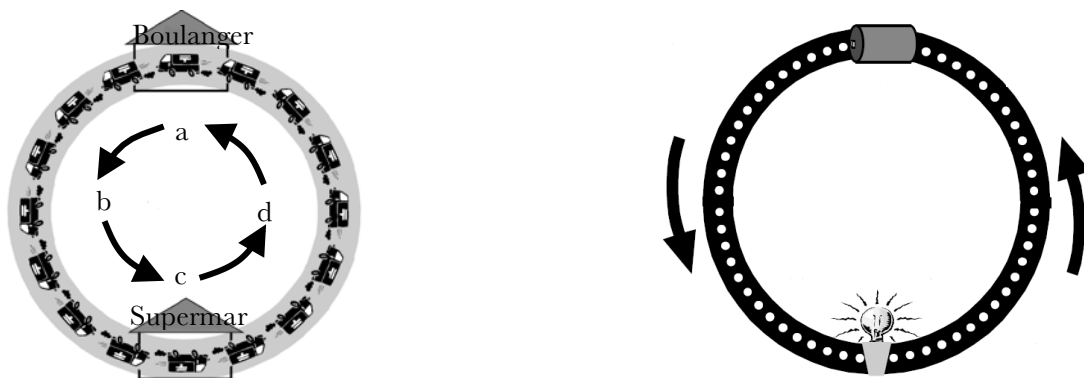


Figure 32: L'analogie boulangère telle qu'initialement proposée par Scott & al. (2006)

Une boulangerie est caractérisée par le nombre de pains qu'elle charge dans chaque camionnette, indépendamment du circuit de supermarchés à livrer (a). Toute livraison à un supermarché ralentit le débit des camionnettes sur l'ensemble du circuit. La vitesse de la chaîne des camionnettes est donc fonction du nombre de supermarchés à livrer et de leurs besoins en pains. Les camionnettes sont les unes derrière les autres et avancent à la même vitesse (b). La vitesse des camionnettes dépend du nombre et des besoins des supermarchés à livrer. Les camionnettes transportent les pains de la boulangerie aux supermarchés où ils sont livrés puis vendus aux clients (c). Chaque camionnette livre le même nombre de pains à un supermarché donné, ce nombre pouvant varier d'un supermarché à l'autre. Après les livraisons, chaque camionnette retourne à vide à la boulangerie pour un nouveau chargement (d). Aussitôt que les camionnettes sont mises en mouvement, les pains sont livrés par celles qui sont au niveau des supermarchés. Le nombre de pains livrés aux supermarchés dépend de la vitesse de la file des camionnettes. Dans cette analogie, l'intensité du courant correspond au nombre de camionnettes par seconde, les porteurs de charge correspondent aux camionnettes et la quantité d'énergie est représentée par le nombre de pains. Cette analogie ne permettant pas d'interpréter ce qu'il se passe en régime transitoire, les camionnettes sur le chemin vers les supermarchés sont déjà chargées, et celles retournant à la boulangerie sont déjà vides. Une livraison exige une vitesse adaptée à chaque supermarché, ce qui a pour conséquence d'imposer une vitesse adaptée à l'ensemble de la

chaîne de camionnettes. De plus, si les camionnettes livrent deux supermarchés identiques, la vitesse de la chaîne diminue de moitié.

Cette analogie a des limites qu'il convient d'expliciter. En effet, elle n'explique pas ce qu'il se passe en régime transitoire, et son utilisation pour les circuits comportant des dérivations est relativement complexe. Par ailleurs, elle met en œuvre des objets et des personnages qui ont des comportements différents dans la vie de tous les jours : les supermarchés n'achètent pas leur pain à une boulangerie, il n'y a jamais une seule route reliant la boulangerie au supermarché... Enfin, il ne faudrait pas que les élèves pensent que les électrons sont pourvus d'un « moteur » pour se mouvoir. Ces limites doivent rester présentes à l'esprit de l'enseignant au cas où les élèves s'aventurent dans des mises en relation excessives des deux domaines. Cela n'a pas été le cas dans les classes dans lesquelles nous avons expérimenté.

Cette analogie a été introduite en cinquième pour aider les élèves à distinguer les concepts généraux « électricité » et « énergie ». Il a été très tentant pour les enseignants du projet de poursuivre dans la même voie en quatrième pour distinguer les concepts de tension et d'intensité. Tous les essais d'extension de cette analogie introduisant ces grandeurs ont montré les limites de la pertinence de cette analogie pour cette distinction. A l'heure actuelle, d'autres analogies utilisables du collège à l'enseignement supérieur sont développées et étudiées (Mercier-Dequidt & Morge, 2014).

La méthodologie adoptée dans les projets DBR étant itérative, la conception de chaque version des séquences s'est appuyée sur l'analyse de l'implémentation la version précédente. Des résultats plus détaillés sur l'utilisation de cette analogie par les enseignants et les élèves sont présentés au chapitre suivant⁵⁹.

1.2 Les registres sémiotiques en jeu dans les activités proposées aux élèves

Dans cette partie, je décris des adaptations d'une séquence en électricité, en lien avec les résultats d'une recherche associée, portant sur les difficultés des élèves à comprendre l'intérêt de la schématisation en électricité.

1.2.1 Évolution des objets à représenter dans l'activité initiale

En classe de cinquième, l'objectif des premières activités était de mobiliser les connaissances préalables des élèves concernant les objets utilisés en classe et de les familiariser avec le mode de fonctionnement des circuits électriques (Figure 33). La première tâche assignée aux élèves était de dessiner un montage pour allumer une lampe avec une pile plate. Ces dessins étaient ensuite discutés en petits groupes, puis les élèves réalisaient l'expérience selon leur propre dessin, puis la modifiaient si la lampe ne brillait pas et expliquaient comment corriger le dessin. Les élèves devaient enfin indiquer les éléments à utiliser pour que la lampe s'allume.

⁵⁹ Le chapitre suivant (chapitre 6) sera consacré aux analyses des pratiques d'étude et d'enseignement produites sur la base du cadre épistémico-sémiotique.

Activité 1 : faire briller une lampe

Attention : tu peux regarder le matériel sur ta table, mais tu ne dois pas le toucher.

1. Fais un dessin qui montre comment faire briller la lampe avec la pile plate
2. Compare ton dessin avec ton voisin. S'ils sont différents, essayez de vous mettre d'accord pour en faire un en commun.
3. Fais l'expérience avec le matériel dont tu disposes. Le dessin sur lequel le binôme s'est mis d'accord était-il correct ? S'il n'était pas correct, refais l'expérience jusqu'à ce la lampe brille et explique pourquoi le dessin n'était pas correct.
4. Quels sont les éléments du montage essentiels pour que la lampe brille ?

Figure 33: texte initial de la première activité d'électricité en cinquième

Face aux difficultés à faire accepter aux élèves les normes et l'utilité de la schématisation d'un circuit électrique, la schématisation était présentée environ 6 semaines après l'élaboration des premiers dessins.

Les réponses des enseignants aux questionnaires post-implémentation reflètent les difficultés des élèves à s'accorder sur un dessin, « ils n'ont pas vraiment échangé d'idées sur une mise en commun éventuelle »⁶⁰, « ils font bien les dessins mais ils les gomment quand ils se mettent d'accord et les changent », à produire des expériences conformes à leurs « dessins peu précis ». La précision des dessins est parfois mise en parallèle du matériel à représenter : « les élèves ne soignent pas suffisamment leurs dessins. Le manque de clarté du dessin est préjudiciable à la compréhension de la manip. Ne faudrait-il pas leur donner le dessin d'une lampe où apparaissent clairement les zones importantes ? ». Cette demande, discutée ensuite en réunions avec les enseignants, a conduit à modifier les objets sur lesquels cette activité s'appuyait pour proposer des objets connus des élèves, le dessin devenant le registre sémiotique support à l'explication du fonctionnement de la lampe de poche (Figure 34).

Activité 1 : Faire briller une lampe

Il existe différents types de lampes de poche, les lampes de poche traditionnelles et les lampes torches.⁷



1. Faites un dessin qui représente ce qu'il se passe à l'intérieur de la lampe de poche traditionnelle quand elle brille.
2. Dessinez diverses expériences avec le matériel proposé qui vous permettront de vérifier ce qu'il se passe dans la lampe de poche traditionnelle quand elle brille.
3. Après accord du professeur, demandez le matériel nécessaire et réalisez vos expériences.
4. Le dessin de la question 1 était-il correct ? Si votre dessin n'était pas correct, refaites un autre qui montre ce qu'il se passe à l'intérieur de la lampe de poche traditionnelle quand elle brille.
5. Quels sont les éléments du montage essentiels pour que la lampe brille ?

Figure 34: texte modifié de la première activité

Les activités introduisant la schématisation sont proposées à mi-parcours de la séquence (Figure 35). Les élèves étaient incités à comparer leurs dessins initiaux. Après avoir précisé si tous les objets utilisés dans les expériences pour faire briller une lampe sont identiques, les élèves indiquaient ce qui pouvait et devait être dessiné. Le registre « schéma » est donc introduit dans la continuité du registre « dessin », avec l'objectif, initialement non affiché auprès des élèves, de simplifier le dessin.

⁶⁰ Les citations sont des extraits des questionnaires rendus par les enseignants concernant la première activité.

Activité 9 : représenter simplement un montage

On souhaite envoyer à un correspondant anglais un dessin, le plus simple possible, qui représenterait la manière dont il faut brancher les objets utilisés dans un montage qui permet de faire briller une lampe.

1. discussion collective : est-ce que tu as dessiné exactement de la même manière que les autres élèves les différents objets des montages que tu as réalisés jusqu'à maintenant ?
2. Sur les montages photographiés sur les transparents, toutes les lampes brillent.
 - a. Indique si les objets utilisés sont identiques ou différents
 - b. Que peux-tu en déduire ?
3. On veut faire un dessin pour le donner à des élèves qui doivent faire un montage qui permet de faire briller une lampe. Ils devront réaliser ce montage avec leur propre matériel qui peut être différent de celui utilisé sur les photos de la question 2. On a fait une liste de ce que l'on peut éventuellement dessiner. Coche les cases de ce qu'il est absolument nécessaire de dessiner.

	Ta réponse	La réponse de la classe		Ta réponse	La réponse de la classe
les pinces crocodile			les fils		
la pile			la couleur des fils		
la forme de la pile			la longueur des fils		
L'interrupteur			La forme prise par les fils		
la lampe					
le support de la lampe					

Est-ce qu'il manque quelque chose ?

Figure 35: texte de l'activité introduisant la schématisation

Les enseignants avaient indiqué dans les questionnaires que certaines caractéristiques des circuits sont déterminantes pour les élèves, alors qu'elles ne sont pas traduites dans les schémas : « *certaines élèves pensent qu'il est nécessaire de représenter la forme des piles car le branchement n'est pas le même et donc le montage n'est pas le même* ». Toutefois, la fonction de communication de ces dessins simplifiés semble un élément justifiant la non-représentation de ces caractéristiques : « *pour enfoncer le clou, le passage par des élèves à l'autre bout du monde permet de faire disparaître les derniers doutes* ».

Lors des réunions de conception collaborative, enseignants et chercheurs ont éprouvé le besoin de préciser les difficultés soulevées par le passage du registre des dessins à celui des schémas. Une étude parallèle à la conception a donc été réalisée, les analyses produites et la conception étant alors intimement mêlées dans des itérations successives propres à la Design-Based Research.

1.2.2 Le passage du registre « dessin » au registre « schéma »

L'étude des activités (liées aux dessins et aux schémas) fut réalisée sous ma direction par deux étudiantes de master (Berthiau & Bertrand, 2009⁶¹). Cette étude a mis en parallèle la schématisation en physique et dans les autres disciplines. Nous avons notamment étudié la manière dont la schématisation était introduite dans les manuels scolaires. Le groupe DBR a ensuite intégré dans les séances les résultats sur l'articulation entre le dessin et le schéma.

Cette étude a pris sa source dans les instructions officielles alors en vigueur : « L'activité de schématisation prend une place tout particulièrement importante dans cette partie du programme : les élèves y manipulent des représentations symboliques codées comme ils l'ont encore peu fait. Cependant, il faut s'assurer que la notion, par exemple, de générateur, est acquise avant de remplacer le dessin par le symbole. La schématisation doit apparaître pour l'élève comme une simplification par rapport au dessin. » (MEN, 2007, p. 120). Il s'agissait également de répondre aux difficultés des enseignants à enseigner les règles de la schématisation en électricité, ressenties par les élèves comme

⁶¹ Il s'agit d'un mémoire professionnel IUFM que ces deux étudiantes, dont l'une était déjà titulaire d'un doctorat, ont réalisé avec la volonté de faire un véritable travail de recherche. Cet objectif a été pleinement atteint.

arbitraires. Les analyses se sont appuyées sur les registres sémiotiques de Duval. Les activités sur lesquels porte ce mémoire sont celles élaborées au sein du groupe collaboratif DBR⁶² (Figure 36).

Activité 1 : Faire briller une lampe

Il existe différents types de lampes de poche, les lampes de poche traditionnelles et les lampes torches. Philémon et Cassiopée comparent leurs lampes de poche, Philémon a une lampe de poche et Cassiopée une lampe torche

1. Faites un dessin qui représente ce qu'il se passe à l'intérieur de la lampe torche de Cassiopée quand elle brille.
2. Dessinez diverses expériences avec le matériel proposé qui vous permettront de vérifier si le dessin de la question 1 est correct.
3. Après accord du professeur, demandez le matériel nécessaire et réalisez les expériences.
4. Le dessin de la question 1 était-il correct ? Si votre dessin n'était pas correct, refaites en un autre qui montre ce qu'il se passe à l'intérieur de la lampe torche quand elle brille.
5. Quels sont les éléments du montage essentiels pour que la lampe brille ?



Figure 36: texte de l'activité (activité 1, chapitre 1) ayant été étudié lors par Berthiau & Bertrand (2008)

Dans cette activité, les élèves s'appuient sur leurs connaissances quotidiennes pour décrire le fonctionnement d'un circuit électrique. Les dessins montrent que, outre les difficultés liées aux conceptions habituellement rencontrées en électricité, les aspects spatiaux, organisationnels, liés aux couleurs, aux marques commerciales des éléments à disposition leur paraissent devoir être représentés. Les analyses indiquent une cohérence des productions des élèves (Figure 37).

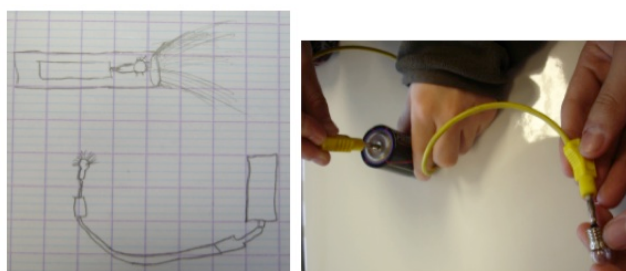


Figure 37: dessins et manipulation d'un groupe d'élèves illustrant la mise en œuvre d'une conception unifilaire de la circulation du courant électrique

La recherche, associée à la conception des activités au sein du groupe collaboratif DBR, a été conduite auprès de 37 enseignants de physique-chimie, SVT, mathématiques et histoire-géographie en collège. Elle a mis en évidence le statut particulier du schéma en physique par rapport à d'autres disciplines. Ainsi, même si le terme de schéma est utilisé en sciences physiques, en mathématiques, en SVT ou en histoire géographie, les fonctionnements des schémas diffèrent selon les disciplines.

- Pour les enseignants de mathématiques, la construction d'un schéma n'obéit pas à des règles, contrairement à la figure géométrique : ils peuvent être une aide à la résolution, à la démonstration, une ébauche réalisée à main levée de ce que sera une figure géométrique (avec un respect approximatif des propriétés géométriques).

⁶² Dans toutes les activités, les élèves suivaient deux personnages, Philémon et Cassiopée, qui s'interrogent sur le fonctionnement des objets, doivent résoudre des problèmes. Outre l'homogénéité des activités proposées, cette forme de présentation avait pour avantage de justifier le recours à des objets quotidiens et d'initier des questions qui se posent au sujet de leur fonctionnement. Les élèves ayant déclaré s'attacher à ces personnages, ils ont été conservés pour les activités de quatrième.

- Pour les enseignants de SVT, les schémas sont différents des dessins d'observation. Ils permettent de construire des synthèses de cours.
- Pour les enseignants d'histoire géographique, les schémas servent également à construire des synthèses sous forme de relations cause – conséquences.

Dans un schéma en physique, on représente les fonctions des objets manipulés par des unités discrètes, qui prennent sens dans leur articulation les unes avec les autres. Dans le dessin, on se focalise davantage sur des détails descriptifs des objets manipulés et ce sont les similitudes entre le dessin et l'expérience réalisée qui vont primer.

L'étude réalisée (Berthiau & Bertrand, 2009) parallèlement au processus itératif de conception a mis en évidence les éléments suivants :

- dès lors que la schématisation en électricité est introduite, les dessins sont abandonnés par les élèves ; les élèves reconnaissent l'universalité des schémas et leur apport comme outil de communication simple, comme cela avait été indiqué dans les réponses des enseignants aux questionnaires ;
- certains aspects des expériences ne sont pas représentés par les schémas alors qu'ils sont déterminants pour les élèves. Par conséquent, les élèves complètent souvent leurs schémas par des informations non conformes aux normes (lampe qui brille, couleur des fils). Tant que ces aspects paraissent significatifs pour élèves, le schéma n'est pas considéré comme le registre le plus pertinent. Les consignes fournies aux élèves, à travers le registre « dessin », doivent donc laisser les élèves traduire les effets du courant sur les composants.
- les schémas tendent à faire oublier aux élèves qu'il est possible de faire un montage sans fil de connexion. La schématisation peut nuire à la manipulation lorsque les élèves n'ont pas encore compris la manière dont les dipôles doivent être utilisés.

1.2.3 L'évolution des activités

Ces résultats légitiment l'introduction tardive de la schématisation : cela laisse le temps aux élèves d'identifier le rôle des éléments dans un circuit, d'apprendre à les connecter en leur donnant du sens par rapport à leurs propriétés électriques (isolant, conducteur). Dans la première activité, les dessins sont les supports des prévisions d'expériences pour qu'une lampe brille. Les élèves doivent ainsi identifier les bornes de la lampe et de la pile et constatent l'obligation de mettre les composants au contact les uns des autres. Les activités réalisées par la suite visent à différencier les interprétations en termes d'électricité et d'énergie (cf. paragraphe 1.3 de ce chapitre, p. 115) dans des circuits électriques simples (une pile, une lampe) : il est proposé aux élèves de réaliser des dessins simplifiés, l'objectif étant centré sur la différenciation des représentations circuit fermé (électricité), chaîne ouverte (énergie). Le dessin est le registre utilisé jusqu'à ce que les circuits deviennent plus complexes, intégrant de nouveaux composants. Après un temps de familiarisation relativement long avec le matériel électrique, le schéma est introduit comme outil de communication sur le circuit réalisé (Figure 38).

Activité 1 : Beatrix est tenue au courant

Cassiopée a réalisé des montages électriques permettant de faire briller une lampe et elle souhaite envoyer à Beatrix, sa correspondante anglaise, les dessins, les plus simples de ces montages. Ces dessins doivent représenter les dipôles utilisés, l'ordre de ces dipôles et le fonctionnement de ces montages. Ainsi Beatrix pourra réaliser des montages équivalents de ceux de Cassiopée mais avec son propre matériel qui est différent de celui utilisé en France.

1. Prévisions :

- A votre avis, coche la case, dans le tableau ci-dessous, de ce qu'il est absolument nécessaire de dessiner
- Est-ce qu'il manque quelque chose dans ce tableau?

	Ta réponse		Ta réponse
les pinces crocodile		les fils	
la pile		la couleur des fils	
la forme de la pile		la longueur des fils	
Ce qui est écrit sur la pile		La forme prise par les fils	
la lampe		L'interrupteur	
le support de la lampe			

2. Recherche documentaire : Observez les différents montages photographiés

3. Exploitation : Sur les montages photographiés, toutes les lampes brillent. Les objets utilisés sont-ils identiques ou différents ?

4. Résultats : Vos prévisions étaient-elles exactes ?



Figure 38: activité introductive à la schématisation (chapitre 2 d'électricité en cinquième)

Dans la conception des activités, le groupe DBR s'est donc attaché à développer une activité pour aider les élèves à s'approprier la nécessité d'une schématisation normalisée, en évitant un sentiment d'arbitraire dans le choix des éléments à représenter. Cette activité introduit les unités signifiantes du schéma (par rapport au dessin) en concevant le schéma normalisé comme outil de communication sur le fonctionnement d'un circuit électrique. Le registre « schéma », distinct du registre « dessin », est présenté avec des fonctions explicites liées à la communication, la normalisation et la simplification. Le schéma permet ainsi à toute personne disposant d'objets de mêmes catégories de réaliser une expérience fonctionnant de manière similaire. Par ailleurs, le recours au schéma à ce moment de la séquence devient indispensable, car les récepteurs qui seront ensuite intégrés aux circuits étudiés (moteur, DEL) sont difficiles à représenter avec le registre « dessin ».

1.3 Mise en parallèle de modèles complémentaires et des représentations sémiotiques associées

Les analyses des premières activités conçues ont montré que la distinction entre courant électrique et énergie était trop implicite (cf. paragraphe 1.1 de ce chapitre, p. 107), du fait de la représentation de ces deux concepts sur un même dessin. Ce choix avait pour origine la volonté de montrer les deux interprétations possibles du fonctionnement d'un circuit : soit en termes d'électricité, soit en termes d'énergie. Ces deux interprétations devaient toutefois être précisées aux élèves.

Activité 2 : Nuit blanche pour les hamsters



Cassiopée veut laisser sa torche électrique allumée toute la nuit pour surveiller son hamster. Philémon lui fait remarquer qu'avant la fin de la nuit, elle ne brillera certainement plus.

- A votre avis, comment pouvez-vous expliquer que la lampe ne brille plus à la fin de la nuit ?
- A partir du document « analogie du circuit des wagons et chaîne de distribution des pains », cherchez :
 - ce que la **pile transfère à la lampe** lorsque la lampe brille.
 - ce que la pile fait circuler dans le circuit électrique lorsque la lampe brille.
- Qu'est-ce qui peut expliquer que la lampe ne brille plus au bout d'un certain temps ?
- Votre réponse à la question 1 était-elle correcte ?
- Quels sont les deux rôles d'une pile dans un montage électrique ?

Figure 39: l'activité introduisant le circuit électrique et la chaîne énergétique

De ce fait, j'ai proposé d'expliciter cette distinction à partir d'une activité mettant en évidence les deux rôles de la pile dans un circuit électrique (Figure 39). La différenciation des concepts d'électricité et d'énergie était alors travaillée au travers de deux modèles, associés à deux représentations complémentaires, l'une liée au circuit des wagons et l'autre à la chaîne de distribution des pains, indiquées sur la Figure 40. Dans ces représentations, le courant électrique circule de la pile vers le récepteur pour revenir à la pile (représentation sous forme circulaire d'un circuit fermé) alors que l'énergie est transférée vers le générateur puis vers l'environnement, (représentation linéaire d'une chaîne ouverte). Ces deux représentations exposées en parallèle, liées à deux interprétations du fonctionnement du circuit électrique, ont aussi été l'occasion d'articuler les travaux conduits lors de mon doctorat, au niveau du lycée, vers le collège. Les connaissances visées n'étant pas du même niveau que celles visées dans les programmes du lycée, les règles concernant la construction des chaînes énergétiques n'ont pas été fournies immédiatement aux élèves. Les travaux réalisés au cours du projet « énergie » (Tiberghien & Megalakaki, 1995 ; Collet, 2000) montraient que les élèves n'avaient pas de difficulté à associer la pile à un réservoir et la lampe à un transformateur d'énergie. Le terme « réservoir » est effectivement utilisé avec une signification proche de sa signification dans la langue quotidienne. Concernant la lampe, le fait de lui attribuer un rôle de transformateur est compatible avec son comportement : elle transforme de l'électricité en lumière et en chaleur. Les transferts d'énergie vers l'environnement posent davantage de difficulté. Aussi, nous avons fourni aux élèves le schéma de la chaîne énergétique correspondant au circuit électrique simple, en faisant l'hypothèse que l'identification des éléments principaux (ici la pile, la lampe et l'environnement) ainsi que l'attribution d'un rôle à la lampe et la pile ne poseraient pas de difficulté particulière. De fait, les retours des enseignants (questionnaires de débriefing et échanges en réunions) après implémentation de cette séance n'ont pas mentionné d'incompréhension de ces deux modèles et représentations associées, même si leur introduction en classe requiert un temps non négligeable.

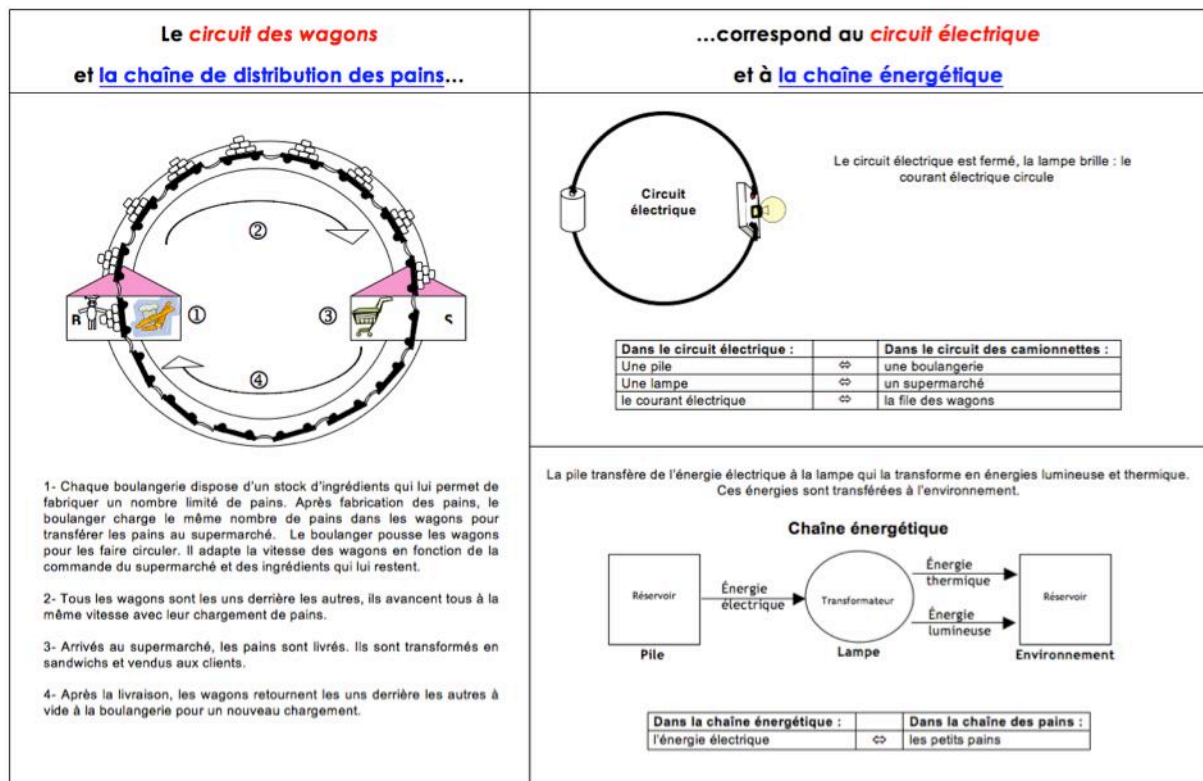


Figure 40: l'analogie présentant deux modèles (circuit électrique, chaîne énergétique) et les représentations associées (circuit des wagons, chaîne des pains)

Cette adaptation des contenus, respectant une vigilance épistémologique et des hypothèses relatives à l'apprentissage (Tiberghien, Psillos & Koumaras, 1995), a rendu explicite, à travers deux représentations visuellement différentes, la mobilisation de deux modèles, liés à des concepts souvent confondus par les élèves. La principale difficulté rencontrée ici, comparativement aux travaux conduits préalablement au sein du projet « énergie » est que les élèves se voyaient proposer simultanément deux représentations. Ils devaient s'approprier des codes différents pour mettre en parallèle deux modèles qui interfèrent souvent l'un avec l'autre (Tiberghien & Megalakaki, 1995).

Cet exemple de mobilisation conjointe de deux modèles (électrique et énergétique), complémentaires au sens de Walliser (1977), et des schémas associés illustre l'articulation entre les modèles enseignés et leurs représentations, porteuses de sens spécifiques aux concepts en jeu. Les relations analogiques entre les objets manipulés dans le circuit électrique et leurs représentations dans chacun des modèles sont explicitées. Selon la situation analysée, les élèves doivent choisir entre le modèle énergétique ou électrique pour interpréter ou expliquer les phénomènes. Cette complémentarité rendue visible sur une présentation simultanée avait également pour objectif d'identifier les différents modèles possibles pour interpréter une même situation, et aider ainsi les élèves à différencier les interprétations en termes d'énergie ou d'électricité.

Les termes utilisés pour qualifier chacun de ces modèles aident aussi à la différenciation: l'électricité est associé au circuit (circuit des wagons, circuit électrique), l'énergie à la chaîne (chaîne des pains, chaîne énergétique). Des activités spécifiques à la mobilisation de chacun de ces modèles ont ensuite été proposées.

Activité 4 : la casquette à ventilateur solaire



Philémon a reçu en cadeau une superbe casquette est équipée d'un ventilateur électrique, d'une photopile et de fils électriques. Dès que le soleil tape sur la casquette, le ventilateur inséré dans la visière se met à tourner.

1. Dans ce circuit électrique
 - a. Quel est le générateur ?
 - b. Quel est le récepteur ?
2. Complète la chaîne énergétique suivante en indiquant les formes d'énergie transférées sur les flèches : énergie thermique, énergie électrique, énergie mécanique, énergie lumineuse.

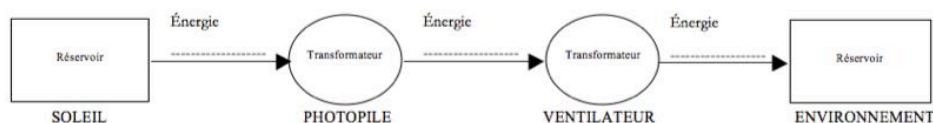


Figure 41: une activité proposant deux interprétations d'une même situation

Dans la Figure 41 par exemple, on propose aux élèves d'attribuer un rôle aux objets étudiés, d'abord électrique, puis énergétique. Les élèves n'ayant pas encore à disposition le schéma électrique, seul le schéma énergétique est proposé, mais les objets sont catégorisés selon deux modèles distincts. Le choix de mobiliser ces deux modèles dans une même activité a pour objectif d'**aider les élèves à percevoir les différences et la complémentarité de ces deux modèles**. Les deux représentations jouent un rôle essentiel pour mettre en évidence la complémentarité de ces modèles. Cet exemple illustre l'intérêt de la combinaison des composante épistémologique (modélisation) et sémiotique (registres) du CÉS.

2 Mobilisation du CÉS pour la conception de séquences dans le cadre du projet « énergie » au lycée

Le modèle énergétique introduit en cinquième via l'analogie s'appuie sur les résultats du projet collaboratif « énergie ». Au cours de ce projet, ayant lui aussi pour objectif de développer des séquences d'enseignement sur la base de résultats de recherche, la conception des activités a également mobilisé des aspects liés au cadre épistémico-sémiotique. Effectivement, mon cadre étant alors en cours de construction, il est difficile d'affirmer que tous les choix opérés alors trouvaient une justification explicite dans le CÉS. Je propose ici, après une brève présentation de l'introduction du modèle énergétique et des séquences associées, une relecture des choix effectués par les différents chercheurs impliqués dans le projet « énergie » au regard du CÉS.

2.1 Introduction du modèle énergétique dans les séquences d'enseignement

Ainsi que je l'ai développé dans le chapitre 2, le projet énergie est né d'un double enjeu pour les enseignants et les chercheurs : il s'agissait de développer des séquences d'enseignement conformes aux injonctions officielles sur l'énergie, tout en prenant appui sur des travaux de recherche conduits en didactique sur l'enseignement et l'apprentissage de ce concept. Les séquences développées devaient « *aider les élèves à distinguer ce qui est de l'ordre du concept et ce qui relève des objets et événements observables, et à prendre conscience qu'on n'associe pas nécessairement qu'un concept à un objet ou un événement* » (Gaidioz & al., 1998, p. 15). Il s'agissait donc bien d'un objectif de modélisation mettant en relation les objets et événements des situations étudiées avec les théories et modèles en jeu.

La première activité ambitionne de faire prendre conscience aux élèves de la nécessité d'introduire un nouveau concept pour expliquer une situation connue : il leur est proposé un montage dans lequel une pile, deux fils sont connectés à une lampe qui brille, puis, on change la pile, et la lampe ne brille plus. Le modèle électrocinétique, préalablement enseigné, ne permet de d'expliquer que la lampe ne brille pas, ni que la pile s'use, ce qui est pourtant un fait connu des élèves. Un texte présentant le modèle énergétique est alors introduit (Figure 4). Ce texte précise les propriétés du modèle, et les règles pour la construction d'une chaîne énergétique. Le modèle est compatible avec un raisonnement causale simple pour que les élèves construisent une chaîne énergétique linéaire, compatible avec la forme de raisonnement spontanément mise en œuvre pour expliquer l'usure de la pile (la pile donne quelque chose à la lampe). De plus, ce modèle est en conformité avec le point de vue de la physique concernant les transferts et transformations d'énergie.

2.2 Des modèles complémentaires et des représentations sémiotiques à distinguer

Les activités conçues au sein de ce projet s'appuient sur la nécessité d'introduire un nouveau modèle, complémentaire, au sens de Walliser (1977), au modèle électrocinétique, de manière à fournir une explication à l'usure de la pile. Les tâches de modélisation consistent à sélectionner des objets de la situation expérimentale et les associer à des catégories préalablement définies dans le texte du modèle puis les représenter en respectant les règles fournies. Lors des recherches associées à ce projet, Megalakaki et Tiberghien (1995) ont montré que l'utilisation du modèle électrocinétique conduisait

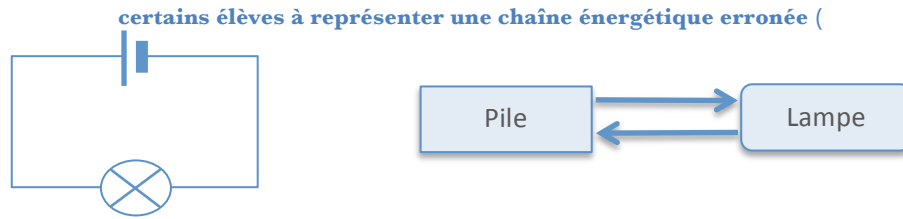


Figure 42), dans laquelle des flèches allaient du réservoir « pile » au transformateur « lampe », comme cela est habituellement représenté lors de la mobilisation du modèle électrocinétique.

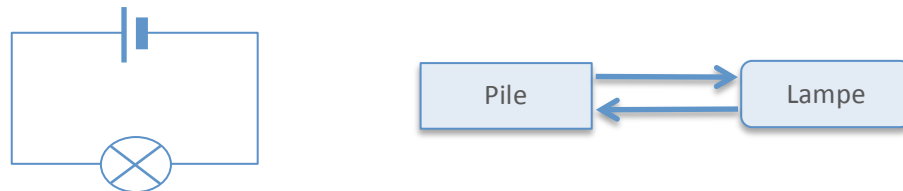


Figure 42: schéma d'une chaîne énergétique construite en mobilisant les connaissances liées au modèle électrocinétique

La représentation d'une telle chaîne n'explique pas l'usure de la pile, car l'énergie fournie à la lampe est ensuite retournée vers la pile. Dans le cas de ce schéma, une des règles n'est pas respectée, car le réservoir final est identique au réservoir initial. Pour ces élèves, le nouveau modèle introduit n'est pas considéré comme complémentaire : les élèves adaptent le modèle électrocinétique préalablement enseigné en créant de nouvelles qualifications : par exemple, le déplacement d'électrons devient le déplacement d'énergie (Megalakaki & Tiberghien, 1995).

Dans la plupart des cas, la recherche a montré que les élèves parviennent à s'appropriier le concept d'énergie, à un niveau qualitatif, en lui attribuant des propriétés de transfert et de transformation, impliquant des réservoirs et des transformateurs d'énergie. Les tâches proposées ont effectivement permis aux élèves d'articuler le modèle, à travers sa représentation sémiotique « schéma » et les objets et événements. En effet, les élèves n'éprouvent pas de difficulté à catégoriser spontanément la pile comme réservoir, du fait qu'elle permet de stocker quelque chose. C'est l'identité de comportement entre une pile et un réservoir, au sens commun, qui facilite cette association (Tiberghien & Megalakaki, 1995 ; Collet, 2000). Concernant la lampe, les élèves parviennent aisément à la catégoriser comme un transformateur, du fait qu'elle a la propriété de transformer. La transformation est une propriété qui se caractérise, pour les élèves, par une différence entre ce qui entre, et ce qui sort (Collet, 1996), l'identification de l'agent et du processus de transformation n'étant pas une nécessité pour la catégorisation. La modélisation de la situation par une chaîne énergétique ne pose problème que pour l'identification des transferts d'énergie, conduisant par exemple à la construction d'un schéma tel que celui présenté en Figure 42.

Cette recherche, menée préalablement à ma thèse, a mis en évidence les articulations que les élèves construisent entre les objets, les phénomènes étudiés, et les éléments du modèle, fourni sous la forme d'un schéma et de règles d'élaboration de ce schéma. Toutefois, d'autres registres sémiotiques sont à mobiliser pour parvenir à une compréhension plus fine des phénomènes énergétiques et des propriétés caractérisant ces phénomènes. « *Other levels of knowledge are involved. In particular language in its many forms: natural language mainly for the experimental field, and also for a part of theory, symbolic representations and figures as results of measurements, and mathematical relations between physical quantities for the models* » (Tiberghien & Megalakaki, 1995, p. 381). Dans les recherches que j'ai menées suite à ces premiers travaux, ce sont

ces autres « niveaux de connaissances », que j'ai caractérisés par des registres sémiotiques au sein de mon cadre épistémo-sémiotique et que j'ai ensuite analysés.

2.3 Articulation de niveaux de modélisation et abstractions intermédiaires

Ainsi que je l'ai précisé dans le chapitre 2 de cette note, le projet « énergie » a fédéré des chercheurs de différentes disciplines. Dans la perspective d'élaborer un EIAO (Environnement Interactif d'Apprentissage avec Ordinateur), ayant pour objectif de construire un modèle de l'activité de modélisation des élèves, l'analyse des tâches de résolution de problème (Bental & al., 1995) a montré que les connaissances mobilisées pouvaient être divisées en quatre domaines :

1. Théorie/modèle : les catégories « réservoir », « transformateur », « transfert », qui permettent de construire les chaînes énergétiques et qui sont proposées dans le texte du modèle relèvent de ce domaine.
2. Champ expérimental : les connaissances sur les objets manipulés par les élèves, pile, lampe, fils appartiennent à ce domaine.
3. Electrocinétique : les connaissances liées de ce domaine ont été enseignées (notion de circuit électrique par exemple) préalablement à la séquence analysée dans le projet.
4. Abstractions intermédiaires : il s'agit d'éléments du champ expérimental pour le physicien mais qui, pour les élèves se référant aux connaissances quotidiennes, nécessite une construction conceptuelle. Trois entités font partie de ce domaine de connaissance : lumière, chaleur et énergie. Les deux premiers termes sont introduits dans le texte du modèle pour qualifier les modes de transfert. Ils ne sont toutefois pas au même niveau que les termes « réservoir », « transformateur » et « transfert », qui sont des catégories pour découper le champ expérimental, alors que les termes « chaleur » et « lumière » précisent les modes de transfert. Ils permettent de qualifier le processus. Le troisième terme « énergie », relève à la fois des connaissances quotidiennes et des connaissances physiques. Son utilisation ne requiert pas la maîtrise de sa signification du point de vue de la physique. La mobilisation des abstractions intermédiaires est une difficulté majeure de l'apprentissage.

Même si ces différents domaines ne sont pas complètement homogènes à notre descriptif en termes de niveaux de modélisation, les deux premiers domaines sont compatibles avec les niveaux des théories/modèles et des objets événements du cadre épistémo-sémiotique. Le domaine de l'électrocinétique relève également du niveau des théories et modèles, en tant que modèle complémentaire à celui en jeu dans les activités proposées. Le domaine des abstractions intermédiaires est celui qui permet d'articuler les deux niveaux des théories et modèles et objets et événements, en qualifiant les phénomènes et les objets observés sur la base des catégories fournies dans le modèle énergétique. Pour Bental et al. (1995), la résolution de la tâche par les élèves nécessite le recours à ces abstractions intermédiaires, de la même manière que j'ai postulé que l'apprentissage de la physique impliquait l'articulation des différents niveaux de modélisation.

Ainsi, il faut proposer des activités au cours desquelles les élèves mobilisent ces abstractions intermédiaires, nécessaires à l'articulation des niveaux de modélisation, mais aussi de considérer les connaissances relevant d'autres domaines (électrocinétique), ou la double appartenance de certains signifiants aux connaissances quotidiennes et scientifiques. Les élèves apprenant sur la base de leurs connaissances antérieures, il s'agira d'aider les élèves à modéliser les situations étudiées, en prenant appui sur les connaissances préalablement enseignées ou non, tout en les aidant à spécifier le sens des

termes mobilisés. A ces fins, dans les activités que j'ai produites avec le groupe collaboratif DBR, le recours à la langue naturelle a autorisé, si ce n'est favorisé l'appropriation de la situation par les élèves.

2.4 Influence des éléments représentés dans le registre schéma sur les activités de modélisation

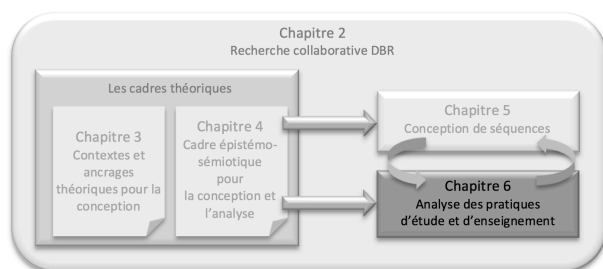
Reprenant des résultats liés à sa participation à ce projet, De Vries (2006) établit un parallèle entre théorie, modèle et champ expérimental et les concepts, entités symboliques et entités matérielles. Un « *modèle scientifique serait alors une représentation d'un champ expérimental du point de vue d'une théorie* » (Ibid., p. 95). Se pose alors le problème de la signification de ce qui est représenté, et de la manière dont les objets sont représentés : « *dans un circuit électrique ou dans une chaîne énergétique – deux modèles d'une pile reliée à une ampoule – le point de vue électrocinétique ou énergétique ne sélectionne ni l'orientation dans l'espace, ni la couleur, ni la marque des composantes. La représentation externe contient à son tour des aspects correspondant à une sélection des aspects du modèle (représentation intrinsèque, extrinsèque) et des aspects non pertinents (représentation artefactuelle). Par conséquent, lorsqu'on examine de l'extérieur une représentation externe d'un modèle, c'est à dire sans partage du point de vue à l'origine de sa construction, le problème de reconnaissance des aspects sélectionnés est double [...]. Dans les situations d'enseignement-apprentissage, le point de vue de l'enseignant (ou de l'expert) ne correspond pas nécessairement à celui de l'élève (ou du novice) et vice-versa* » (Ibid., p. 95). Les choix opérés pour représenter une situation expérimentale sur la base d'un modèle ne sont pas triviaux pour les élèves, il faut donc prendre soin que ces choix apparaissent comme non arbitraires si l'on souhaite que les élèves reconnaissent cette représentation comme pertinente. Ce point de vue explique la tendance des élèves à représenter les fils électriques sur les flèches de transfert d'énergie ou à produire, pour les plus jeunes des élèves, un schéma reflétant la configuration spatiale des objets manipulés (de Vries, 2000). Le fait de travailler en binôme et d'inciter les élèves à discuter leurs productions sont des facteurs aidant les élèves à s'approprier les choix concernant les objets et événements à représenter. Les temps collectifs se sont avérés indispensables à la fin de chacune des situations étudiées : les enseignants présentaient alors les représentations conformes au modèle, éventuellement en les confrontant à des représentations non conformes. Ces temps de discussion collective, mobilisant le registre de la langue naturelle associée au registre schéma et articulant les différents niveaux de modélisation en jeu dans l'activité, offrent l'opportunité de reprendre les différents éléments de savoirs mobilisés de manière autonome par les élèves. Ces temps ont ensuite fait l'objet de recherches spécifiques, sous l'appellation « debriefing » (Khanfour-Armalé, 2008 ; Bécu-Robinault & al., 2010).

Par ailleurs, les registres sémiotiques mis à disposition des élèves tendent à légitimer le recours à des connaissances (quotidiennes ou scientifiques) en sélectionnant des aspects désignés comme pertinents. Il s'agit donc de ne pas proposer de représentations qui orienteraient les activités des élèves vers la mobilisation de connaissances entravant le recours au modèle énergétique. Dans les groupes DBR, des modifications ont ainsi été apportées aux représentations sémiotiques « schémas » de la situation expérimentale relative à l'introduction du concept de puissance. En effet, il était initialement proposé aux élèves une représentation schématisée du circuit électrique à construire. Or, cette représentation orientait les élèves vers une interprétation de la situation expérimentale dans les termes de l'électrocinétique. Nous avons donc modifié le texte de l'activité pour fournir une représentation des chaînes énergétiques à étudier, sur laquelle les élèves devaient ensuite faire figurer le concept de puissance (voir chapitre suivant, Figure 47). Cette modification a provoqué une conversion de registre encore peu sollicitée jusqu'à cette phase de la séquence d'enseignement : du registre schéma vers la manipulation des objets et la langue naturelle.

Cette présentation montre que, pour la conception des activités au sein du projet « énergie », soit préalablement à toute implémentation, soit au fil des itérations, de nombreux choix sont en adéquation avec les éléments du cadre épistémio-sémiotique. Les analyses qui ont été ensuite conduites et que j'expose dans le chapitre suivant, ont affiné ces choix de conception en lien avec l'étude de leur influence sur les activités des élèves.

- Chapitre 6 -

Les analyses produites avec le cadre épistémo-sémiotique



Dans ce chapitre, je présente les résultats de mes recherches sur les pratiques d'étude et d'enseignement, mobilisant le cadre épistémo-sémiotique. Dans un premier temps, j'expose les méthodologies de collecte et de traitement des données, comment elles ont évolué en fonction des éléments considérés et des objets analysés. Dans un deuxième temps, je présente les résultats concernant l'analyse de l'étude, centrée sur les élèves, et ceux liés à l'analyse des actions du professeur en interaction avec les élèves et des productions issues de ces interactions.

1 Introduction

Caractériser les pratiques d'enseignement et d'étude nécessite d'élaborer une méthodologie d'accès aux actions conduites *in situ* par les enseignants et les élèves de classe. Toutes mes analyses liées au cadre épistémo-sémiotique portent sur les contenus des interactions entre enseignants et élèves ainsi que sur les productions des élèves lors de l'implémentation de séances élaborées au cours de projets apparentés à la DBR. Analyser des situations de classe réelles, capter les interactions entre enseignants et élèves n'est jamais une tâche aisée. Outre les problèmes techniques de captation audio et vidéo, les lois protégeant l'image des participants sont à respecter si l'on souhaite utiliser ces données à des fins de formation ou de communication. J'ai eu l'opportunité de participer aux réflexions d'équipes de recherches fortement impliquées dans les méthodes et les conditions de l'utilisation de la vidéo, ce qui a considérablement aidé à mes prises de données et enrichi mes analyses. Dans ce chapitre, je centrerai tout d'abord mes propos sur les méthodes de collecte et de traitement des données en relation avec mon cadre épistémo-sémiotique puis je présenterai quelques résultats en lien avec les différents projets apparentés à la DBR auxquels j'ai participé.

Pour avoir accès à la manière dont les enseignants traitent les contenus d'enseignement avec les élèves, et dont les élèves s'en emparent, des méthodologies spécifiques ont été élaborées, en association avec des techniques de prise et de traitement de données. La posture du chercheur, tant dans la collecte des données que dans les traitements pour les rendre exploitables, ainsi que les critères d'analyse ont bien entendu une influence sur les résultats. Par ailleurs, l'évolution des technologies disponibles, notamment le passage des enregistrements analogiques à numériques, le développement de logiciels d'analyse et de synchronisation vidéo, a fait émerger de nouveaux questionnements. Ainsi, c'est parce qu'il est devenu possible de synchroniser le visionnage de prises de vue différentes et complémentaires (un groupe d'élève et l'enseignant se déplaçant dans la classe, par exemple) que l'analyse simultanée des pratiques d'enseignement et d'étude fut réalisable. Ces sont ces éléments que je détaillerai dans la première partie de ce chapitre, dédiée à la méthodologie.

2 Méthodologie

Dans cette partie, j'examine mes méthodes de collectes et de traitement des données depuis ma thèse jusqu'à ce jour. J'ai repris certains de mes écrits, tout en les réorganisant et les précisant, de manière à percevoir les évolutions liées au cadre épistémio-sémiotique au fil de mes travaux et les perspectives de recherche envisageables à partir de ces évolutions.

2.1 Constitution du corpus de données

2.1.1 Les dispositifs de collecte de données

Dans le cadre du projet « énergie », l'idée directrice était d'analyser le processus d'étude et pas seulement les réponses produites à l'issue de l'activité. J'ai donc choisi d'observer la manière dont les élèves discutaient les contenus (objets manipulés, événements observés, concepts, relations construites et lois et principes mis en œuvre) pour produire un compte rendu commun. La rédaction commune était un prétexte pour obliger les élèves à communiquer. Les enregistrements en audio et vidéo d'un groupe d'élèves (ou deux selon les classes) me donnaient accès aux échanges dans le groupe suivi et aux paroles de l'enseignant. Les analyses ont ainsi porté sur les productions écrites et verbales des élèves, en réaction aux demandes formulées par l'enseignant.

Au cours des projets « collègue », j'ai complété ce dispositif de collecte par un enregistrement vidéo de l'enseignant, soit en plan fixe, soit en suivant ses déplacements selon les besoins. Avec ce dispositif j'identifie à qui s'adresse l'enseignant, et je visualise les éléments manipulés ou désignés par l'enseignant face à sa classe ou aux différents groupes d'élèves (Figure 43).



Figure 43: combinaison des prises de vue: une caméra suit l'enseignante, l'autre est focalisée sur les élèves.


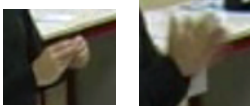
2.1.2 Des données collectées aux données analysées

Au moment de ma thèse, entre 1994 et 1997, les dispositifs de visionnage des vidéos n'offraient pas un accès aisé à des moments précis de la séance ni d'associer la vidéo à d'autres données. Il fallait rendre ce corpus facilement manipulable pour accéder aux contenus des interactions. J'ai donc intégralement transcrit les paroles des élèves et de l'enseignant à partir des enregistrements audio, les vidéos étant mobilisées lorsqu'il ne m'était pas possible de comprendre ce sur quoi les élèves agissaient, ce qu'ils désignaient ou lorsque l'attribution des tours de parole ou de la rédaction du compte-rendu commun posait problème. La transcription intégrale permet de situer chaque moment analysé au regard de la séance en cours et éventuellement d'établir des articulations entre les paroles et les actions des élèves à différents moments de la séance.

La transcription des interactions orales nécessite un choix concernant sa forme et le découpage des verbalisations (en intervalles de temps fixes, selon les changements de locuteur, en contenus propositionnels). Je souhaitais mettre en évidence les niveaux de modélisation (Objets / Événements, Mesure, Modèle mathématique, Modèle Physique, Théorie, voir chapitre 4, p. 93) mobilisés par les élèves ou l'enseignant au cours de leurs interactions. J'ai choisi un premier découpage en tours de parole, et je n'ai considéré les chevauchements que lorsqu'ils modifiaient la signification du contenu des interactions. De même, les tentatives d'interruption ne conduisant pas à un changement de locuteur n'ont pas été analysées.

A des fins de communication et de présentation des résultats, en lien avec l'évolution des questions de recherches et l'intégration des interactions multimodales, la forme des transcriptions a également évolué. Les gestes étant un mode de communication des informations sur les objets et/ou leur modélisation, j'ai parfois adjoint des photos et des descriptions de gestes. Les transcriptions multimodales sont par exemple utilisées quand des éléments de modèles sont mimés par l'enseignant ou par les élèves (voir l'exemple donné dans le Tableau 5).

Tableau 5: transcription multimodale (interactions verbales et non verbales, associées aux images des gestes réalisés) d'une interaction au cours de laquelle l'enseignant et les élèves miment la position des filtres colorés pour produire de la lumière blanche (E = élève ; P = Professeur)

217	E2	ben on les met sur	
218	E3	on les met	
219	E2	on les superpose	
220	E3	l'un derrière l'autre	
221	P	on les superpose (rassemble les mains devant lui, les doigts se touchent cercle aplati) c'est à dire on fait (tape dans les mains)	

2.1.3 Définition de l'entité apprenante

Dans un premier temps, j'ai essentiellement analysé les verbalisations des élèves. Les consignes de travail incitaient à collaborer en vue de la production d'une réponse commune⁶³. Cette forme de travail a des répercussions sur l'analyse des contenus des interactions du point de vue de la modélisation et des registres sémiotiques. De ce fait, il a fallu définir « l'unité apprenante » à laquelle attribuer les contenus propositionnels énoncés par l'un ou l'autre des élèves. J'ai choisi de considérer le groupe d'élève comme une entité globale, sans différencier les apports individuels : il était effectivement difficile d'attribuer clairement le contenu d'un tour de parole à l'un ou l'autre des interactants. Ce sont bien les contenus énoncés au fil de l'activité traitée, indépendamment de leur énonciateur, qui conduisent *in fine* l'un ou l'autre des élèves à émettre une nouvelle idée, à mettre en relation des éléments précédemment énoncés... J'ai donc produit une analyse *des activités conjuguées des élèves en interaction*. Dans la suite de cette note de synthèse, j'utiliserai le terme « activité » au sens commun, sans chercher à prendre en charge les aspects temporels et les buts poursuivis à court ou long terme (Venturini, 2012). Je ne distinguerai donc pas les actions individuelles éventuellement

⁶³ Si cette demande a été comprise par l'ensemble des enseignants pour les besoins d'une recherche sur une activité donnée, elle apparaissait peu adaptée aux besoins de l'enseignement lors du suivi de l'implémentation d'une séquence complète. Afin que chaque élève garde une trace des activités conduites, assez fréquemment, les enseignants ont demandé aux groupes de s'accorder à l'oral sur une réponse commune qui devait ensuite être reproduite par écrit, individuellement, par les élèves dans leur cahier.

automatisées et les activités des élèves impliquant des dimensions intentionnelles et collectives (Bronckart, 2005).

Par ailleurs, le découpage en tours de parole ne doit pas faire croire que les contenus propositionnels sont contraints par ce découpage :

- si un élève fait différentes propositions dans un même tour de parole, alors ce tour correspond à plusieurs contenus propositionnels ;
- s'il complète une proposition de son binôme, ce sont plusieurs tours de parole qui constituent un contenu propositionnel.

Je préciserai dans le paragraphe 2.2.2 de ce chapitre, p. 127, comment les interventions des élèves ont été catégorisées en propositions relatives aux niveaux de modélisation.

2.2 Grille d'analyse : les niveaux de modélisation et registres sémiotiques mobilisés dans les analyses

2.2.1 Les descripteurs utilisés dans les analyses

Les catégories d'analyse des transcriptions sont liées au cadre épistémio-sémiotique défini au chapitre 4. J'ai découpé les tours de paroles, ou je les ai combinés afin que les propositions résultant de ces découpages ou combinaisons aient du sens du point de vue des niveaux de modélisation. Pour rappel, j'indique dans le Tableau 6 les descripteurs utilisés pour analyser les données collectées. J'indique en parallèle la structuration de la modélisation en deux mondes telle que définie par Tiberghien (2009), mes niveaux de modélisation relevant soit de l'un, soit de l'autre de ces mondes. Ainsi, selon la catégorisation en deux mondes (Tiberghien, 1994 ; Tiberghien & Vince, 2005), les niveaux de la théorie, des modèles physique et mathématiques relèvent du monde des théories et modèles, et les niveaux des objets/événements et de la mesure relèvent du monde des objets et événements.

Tableau 6: descripteurs des contenus propositionnels dans les transcriptions

Les deux mondes (Tiberghien & al., 2009)	Niveaux de modélisation (Bécu-Robinault, 1997b[1]; 2004[4])	Registres sémiotiques (Bécu-Robinault, 1997a)
Monde des théories et modèles	Théorie	Langue Naturelle
	Modèle Physique	Ecriture Symbolique
	Modèle Mathématique	Graphes
Mondes des objets et événements	Mesures	Schéma
	Objets/événements	Dessin

Ce tableau fait apparaître les cinq niveaux de modélisation et les cinq registres sémiotiques définis pour mes analyses. Cette catégorisation n'est en aucun cas universelle : elle est liée à l'analyse *a priori* des situations et des d'activités demandées aux élèves dans le cadre de mes projets. Par exemple, le registre « dessin » n'a été analysé que pour les projets « collège », car il n'a jamais été mobilisé dans les séances analysées dans le projet « énergie ».

Les critères de catégorisation dans les différents niveaux de modélisation sont lexicaux, syntaxiques et contextuels. Dans les analyses, j'ai donc considéré les termes utilisés, la manière dont ils sont articulés et les caractéristiques de la situation d'enseignement.

2.2.2 Catégorisation des tours de parole en propositions

La communication d'une information relevant d'un niveau de modélisation quel qu'il soit mobilise un ou plusieurs registres sémiotiques. Selon les cas, les élèves produisent des schémas, des graphes associés au niveau des modèles, des dessins pour les objets et événements... Pour catégoriser les registres mobilisés, je me suis appuyée à la fois sur les transcriptions des discours et sur les productions écrites.

Les transcriptions des séances sont analysées à l'aide de ces catégories. Les tours de parole des élèves sont alors regroupés en *propositions* relevant d'un ou plusieurs niveaux de modélisation, associé(s) à un ou plusieurs registres sémiotiques. A un tour de parole peut correspondre une ou plusieurs propositions et réciproquement.

- **Exemple 1** : un tour de parole correspondant à une proposition :
 - Phil : Ben oui, delta ça change toujours ! c'est les variations de trucs sur les variations de trucs... on a toujours un rapport, c'est la puissance je t'avais dit ! c'est la puissance libérée...

Ce tour de parole fait état d'une proposition mettant en relation le niveau du modèle mathématique avec le modèle physique.

- **Exemple 2** : un tour de parole composé de plusieurs propositions :
 - Jane : 2,5 Watts par tour (1). L'énergie en Watt (lit le texte). Au bout de zéro tour, elle [implicitement, l'énergie] est de zéro (2)... Ben, c'est tout décalé en plus.

Ce tour de parole comporte deux propositions :

(1) : Jane lit la valeur inscrite sur le compteur EDF. La proposition met en œuvre le niveau de la mesure.

(2) : Jane associe au nombre de tours la valeur que prendra l'énergie. La proposition met en œuvre le niveau des objets et événements en relation avec le niveau du modèle mathématiques.

- **Exemple 3** : plusieurs tours de parole composent une proposition :
 - Jean : Et le thermomètre ?

Marc : le thermomètre avec celui-là !

Jean : Je le mets où ?

Marc : Ben avec l'autre là !

Jean : Ah ouais, mais il y en avait un autre, j'avais pas vu !

Ces échanges font référence à la place que doit prendre le thermomètre dans le montage. La proposition, regroupant cinq tours de parole, met en œuvre le niveau des objets et événements.

Ces exemples montrent que les propositions d'élèves peuvent mobiliser un des niveaux de modélisation ou plusieurs simultanément.

- Une proposition peut mettre en œuvre un niveau *seul*. C'est le cas lorsque la proposition d'un élève ne concerne qu'un objet matériel, ou un seul concept physique.

- Une proposition peut relever d'un seul niveau dont les éléments sont mis en relation sous des formes différentes. C'est le cas lorsqu'un élève associe un événement à un autre par exemple. C'est ce que nous nommerons une *relation interne* (à un niveau)
- Une proposition peut concerner plusieurs éléments relevant de niveaux différents mis en relation, par exemple lorsqu'un événement est interprété, expliqué par un élément du modèle physique. C'est ce que nous appellerons une mise en *relation externe* (entre deux niveaux)
- Enfin, il est possible qu'une proposition relève d'une *fusion* entre deux niveaux, ce que Tiberghien et Megalakaki (1995) nomment *intermediary interpretation*. Dans ce cas, la proposition met en œuvre deux niveaux, non explicitement différenciés. Des termes usuellement associés à différents niveaux de modélisation sont présents dans la proposition comme si ils appartenaient au même niveau.

L'analyse des transcriptions, associées à celle des productions écrites me permet d'associer les niveaux de modélisation et les représentations sémiotiques sur la base de critères préalablement établis.

2.3 Les outils d'aide à l'analyse

Dans ce paragraphe, je présente très brièvement les outils mobilisés pour l'analyse des données vidéo. En effet, si le choix du logiciel doit se faire en fonction des questions de recherche, les possibilités offertes par ces outils ne sont pas sans conséquences sur les analyses effectuées.

2.3.1 Le choix des données vidéos

Le dispositif collaboratif de recherche a des implications sur le rôle du chercheur dans les prises de données. Dans une classification des rôles du chercheur sur le terrain devenue classique aujourd'hui, Gold (1958) identifie quatre rôles selon l'engagement du chercheur avec les acteurs :

- **le participant complet** : le chercheur participe clandestinement aux actions du groupe sans être repéré ;
- **le participant observateur** : le chercheur contribue pleinement aux actions du groupe d'acteurs observé ; c'est un pair, mais il est reconnu comme observateur ;
- **l'observateur participant** : il est intégré au groupe mais son action sera limitée ; il est reconnu comme observateur, mais n'est pas un pair ;
- **l'observateur complet** : il est reconnu comme observateur, mais ne prend en aucun cas part aux actions conduites par le groupe.

C'est cette dernière posture que j'ai adopté au fil de mes collectes de données dans les classes, afin d'avoir le minimum d'influence sur les décisions prises par l'enseignant et sur les productions des élèves. Bien entendu, le fait d'avoir un chercheur dans la classe n'est certainement pas neutre. Il influence la nature et les contenus des interactions entre les différents acteurs.

Plusieurs modes de collecte des données dans les classes sont envisageables (Martineau, 2005).

- **Les notes de terrain** : ce mode implique une description en temps réel du terrain (personnes, lieu, actions réalisées), et des situations (formes des interactions, événements). Ces notes peuvent être complétées d'éléments subjectifs comme les impressions du chercheur.
- **La grille d'observation** : le chercheur élabore des grilles pour centrer son attention sur les éléments de la situation en lien avec les questions de recherche, et standardisant les observations conduites sur la durée. Il peut, par exemple, élaborer une carte retraçant les

déplacements de l'enseignant dans la classe, ou inscrire les modalités de travail (en groupe, en classe entière, individuel) en fonction des activités à réaliser.

- **Les outils électroniques d'enregistrement des données** : deux outils sont mis en œuvre dans le cadre de recherches essentiellement qualitatives : les outils de captation de la voix et les systèmes d'enregistrement vidéo. Même si ces derniers donnent l'illusion de capter l'intégralité de la scène, il faut garder à l'esprit que la position de la caméra ne donne jamais accès à l'entière complexité d'une situation.

Tout comme les productions écrites des élèves, les enregistrements vidéo sont un archivage pérenne des données permettant au chercheur de reproduire ses analyses, de les partager (Tiberghien & Sensevy, 2012). Les données vidéo rendent également visible la communication entre l'enseignant et les élèves et entre élèves (Goldman & McDermott, 2007). Outre la permanence de l'information disponible, cette forme de données autorise la reconstruction des événements en évitant les biais liés aux notes de terrain ou à la grille d'observation, de faire varier les analyses (sur les gestes uniquement par exemple), et de donner accès à la densité de l'information portée par la parole et les gestes, à la simultanéité des actions, aux inscriptions personnelles et publiques (Cross, 2009). Les avantages des enregistrements vidéo sont donc multiples : *« they keep an analogical relation to the situation itself in particular with regard to space and time. The succession of events is similar and the relative time of events is kept, the respective places of the actors can also be conserved. This analogical aspect means that video can account for a part of the classroom complexity of the situations »* (Tiberghien & Sensevy, 2012, p. 175). Pour autant, ces données ne peuvent révéler l'intégralité de la situation, les pratiques d'enseignement et d'études s'inscrivant notamment dans des contextes institutionnels qui ne sont pas intégrés à la prise de données vidéo. Ces contextes influencent toutefois les contenus et la nature des interactions. Ces données doivent donc être complétées par d'autres informations, notamment sur le contexte et les caractéristiques des interactants (élèves et enseignants).

Souhaitant analyser les contenus des interactions entre élève ou entre enseignants et élèves, c'est donc naturellement que je me suis orientée vers la prise de données vidéos, associée à d'autres données, comme les productions écrites ou des entretiens avec les enseignants. Les questionnaires complétés par les enseignants, présentés au chapitre 2, fournissent un retour sur les activités réalisées dans le cadre d'une Design-Based Research, et donnent à voir les particularités locales lors de la mise en œuvre des séquences d'enseignement⁶⁴.

2.3.2 Synchronisation des vidéos et des transcriptions

Comme exposé au paragraphe précédent, la vidéo a des relations analogiques fortes avec la situation étudiée. Les situations de classe sont complexes, tant du point de vue du nombre d'acteurs, que des organisations spatiales, des formats d'interactions et d'inscription et des contenus des interactions. Ainsi que je l'ai indiqué précédemment, j'ai souhaité étudier les contenus des interactions, les modalités de productions de ces contenus, ainsi que les traces produites par les élèves. Ce choix, requiert *a minima* d'analyser conjointement les gestes et la parole. De ce fait, il faut des outils pour

⁶⁴ Dans ces questionnaires, les enseignants ont souvent fourni des informations donnant à comprendre le contexte d'enseignement, les situations particulières justifiant des adaptations locales des séances implémentées. Les informations fournies dans ces questionnaires sont souvent de nature très différentes d'un enseignant à l'autre.

synchroniser le discours des élèves avec les gestes. Le logiciel Transana⁶⁵ permet cette synchronisation, en plus de fournir des outils pour la définition progressive des catégories de codage. De nombreuses recherches se sont appuyées sur ce logiciel et en ont analysé les potentialités (Seck, 2007 ; Cross, 2009 ; Badreddine, 2009 ; pour ne citer que les premières thèses réalisées au sein de l'UMR ICAR). Je ne vais pas développer ici l'ensemble des analyses envisageables avec ce logiciel, mais seulement présenter ses intérêts en relation avec mes objets de recherche.

Le logiciel Transana était initialement composé de quatre fenêtres de travail :

1. Fenêtre de gestion de la base de données (vidéos, transcriptions associées, épisodes, mots clés, etc.).
2. Fenêtre de saisie et de visualisation de la transcription et des balises temporelles pour la synchronisation avec la vidéo et le découpage en propositions.
3. Fenêtre de visualisation et de lecture de la vidéo, que l'on synchronise avec la transcription et la bande son.
4. Fenêtre de visualisation du son. L'affichage du niveau sonore est intéressant pour visualiser l'organisation des activités en classe en lien avec les prises de paroles des différents acteurs.

Des évolutions ont ensuite été apportées : visualisation de plusieurs vidéos synchronisées, représentations des analyses, insertion de photos dans la transcription... Lors de mes analyses, j'ai utilisé une version limitée à la visualisation de deux vidéos, synchronisées avec une transcription. Je n'avais à ce moment pas la version permettant les représentations des analyses, ni l'ajout de documents annexes aux transcriptions (Figure 44).

Afin d'accéder aux activités de modélisation, aux registres de représentation sémiotiques associés, et aux modalités de production de ces représentations, il fallait associer les formulations verbales à des gestes, ou à des productions écrites. Du fait de la densité des données vidéo, une sélection des informations à analyser s'avère indispensable. Aussi, j'ai procédé à un découpage de la transcription en grandes phases en lien avec les activités des élèves et les consignes fournies. Ces phases relèvent de l'organisation fonctionnelle de la classe (présentation de la situation, manipulation, prise de mesure, conclusion...) ou de la structuration *a priori* de la séance par l'enseignant (découpage en conformité avec les questions adressées sur les feuilles de consignes) et non de thèmes relatifs au savoir, même si des marqueurs langagiers indiquent la transition entre ces différentes phases (Cross & al., 2009). J'ai ensuite sélectionné et décomposé les phases sur lesquelles portaient mes questions de recherche : présentation du modèle, aide aux élèves en difficulté pour interpréter, expliquer ou prédire les phénomènes en jeu.

⁶⁵ Transana est un logiciel développé par le Wisconsin Center for Education Research. Il a été développé sur la base des besoins de chercheurs initialement par Chris Fassnacht puis par David Woods. De nouvelles fonctionnalités sont développées, en fonction des évolutions des recherches.

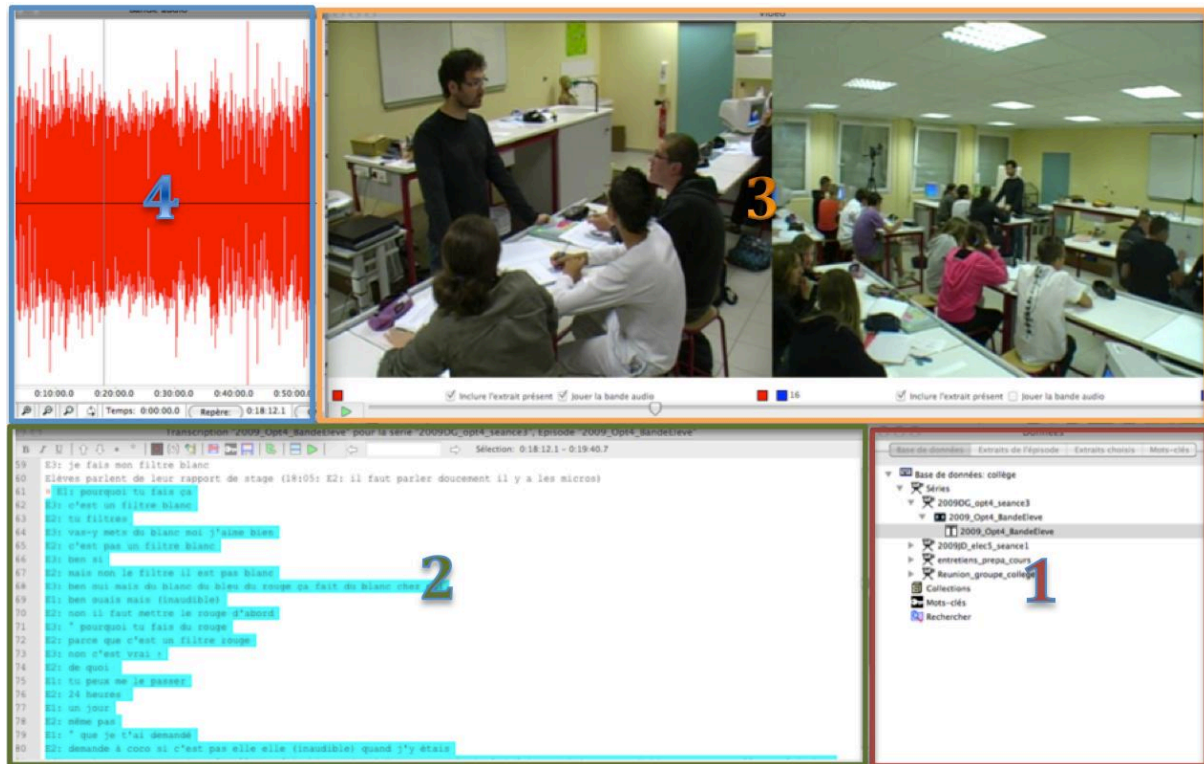


Figure 44: copie d'écran du logiciel Transana pour une analyse d'une séance sur l'optique en quatrième.

Sur la base de ce découpage j'ai identifié des moments du cours à analyser plus finement sur la base des descripteurs des activités de modélisations et des registres sémiotiques : introduction des activités, reformulations de la consigne par les enseignants, débats et phases de synthèse. Des résultats, en lien avec les analyses produites avec le cadre épistémo-sémiotique, seront présentés dans les paragraphes suivants de ce même chapitre.

Dans le cadre de collaborations avec d'autres chercheurs, j'ai également utilisé d'autres outils développés en partenariat avec le laboratoire de recherche ICAR, tels que Tatiana⁶⁶. Tout comme Transana, ce logiciel permet de coder les interventions et d'associer la vidéo à la transcription. Il offre la possibilité d'instancier des catégories d'analyse multiples et d'associer chaque intervention à une ou plusieurs des catégories d'analyse préalablement définie (voir Figure 45, les interactions sont analysées sur la base de trois catégories : les productions écrites associées, les niveaux de modélisation, les supports manipulés). Il n'est toutefois pas possible de coder une même intervention (prise de parole non interrompue de l'un des interactants) sous deux catégories différentes (ex : modèle numérique, modèle physique). Pour ce faire, il faut redécouper les interventions en propositions. Le découpage opéré lors de la transcription a donc des répercussions sur les analyses conduites et peut donc influencer les résultats obtenus : par exemple, les interprétations qui sont faites de l'évolution des niveaux de modélisations mis en œuvre, le nombre de niveaux de modélisation mobilisés et leur mise en relation. Il s'avère qu'en situation d'interaction réelle en classe, les échanges entre élèves sont souvent très rapides. Il est donc rare que les interventions des élèves au sein d'un groupe soient très longues et mettent en œuvre plusieurs propositions différentes. Cela n'est pas le cas pour les

⁶⁶ Le logiciel Tatiana a été développé dans le cadre d'une thèse de doctorat par Gregory Dyke (Dyke, Lund & Girardot, 2009). C'est un outil d'analyse des interactions, qui permet de combiner des données vidéos, textes.

interventions des enseignants, qui sont souvent beaucoup plus longues et qui contiennent de ce fait fréquemment plusieurs propositions, relevant de divers niveaux de modélisation, s'appuyant sur de multiples registres sémiotiques.

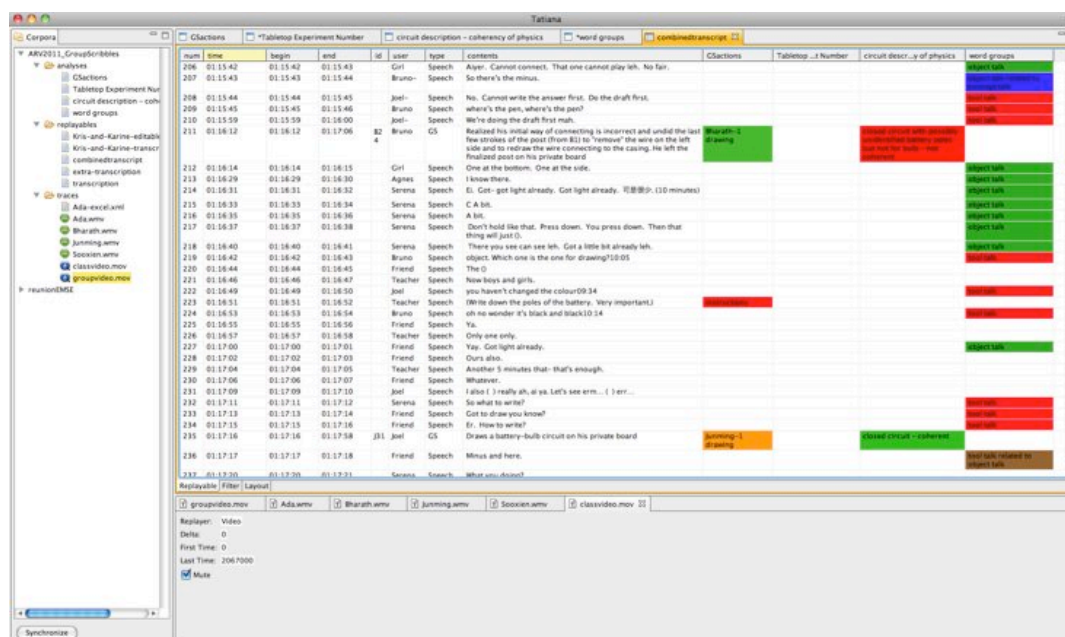


Figure 45: copie d'écran du logiciel Tatiana, avec les analyses des transcriptions et productions des élèves dans le cadre du projet Productive Multivocality⁶⁷ (Lund & Bécu-Robinault, 2013[14]).

Dans le logiciel Tatiana, la transcription analysée est synchronisée avec les différentes vidéos à disposition. Sur la Figure 46, six vidéos (une vidéo pour chacun des quatre élèves d'une école de Singapour, âgés de 10 ans, une vidéo du groupe de quatre élèves, et une vidéo de la classe entière) sont synchronisées avec la transcription de la Figure 45. Les quatre vidéos à gauche sont des enregistrements en temps réel des actions réalisées par les élèves sur leur ordinateur portable à écran tactile. Il avait été envisagé que la webcam donne à voir et entendre les élèves, mais ceux-ci se déplaçant en permanence, ces enregistrements n'ont pas pu être exploités. Des micros sans fils couplés à des enregistreurs numériques complétaient la prise de données. La vidéo en haut à droite est la vidéo du groupe suivi et la vidéo en bas à droite est la vidéo de la classe entière. Cet exemple illustre la difficulté à capter la totalité de la scène, malgré la multiplication des prises de vue : sur la vidéo du groupe, selon la position des élèves par rapport à la caméra, il n'est pas possible de visualiser les gestes réalisés.

⁶⁷ Ce projet, qui a associé 35 chercheurs de 10 pays, n'est pas un projet de type Design-Based research. Au cours de ce projet qui a donné lieu à publication d'un ouvrage (Suthers & al., 2013), cinq groupes de chercheurs se sont engagés à analyser des données identiques, chacun avec le cadre théorique de référence. Les analyses ont ensuite été mises en relation autour de la définition de moments pivots. L'objectif du projet était de permettre de développer les théories mobilisées dans chacun des domaines scientifiques, et non pas de chercher une unification des théories ni d'éliminer les différences de point de vue, mais de voir en quoi les différences permettaient de progresser.

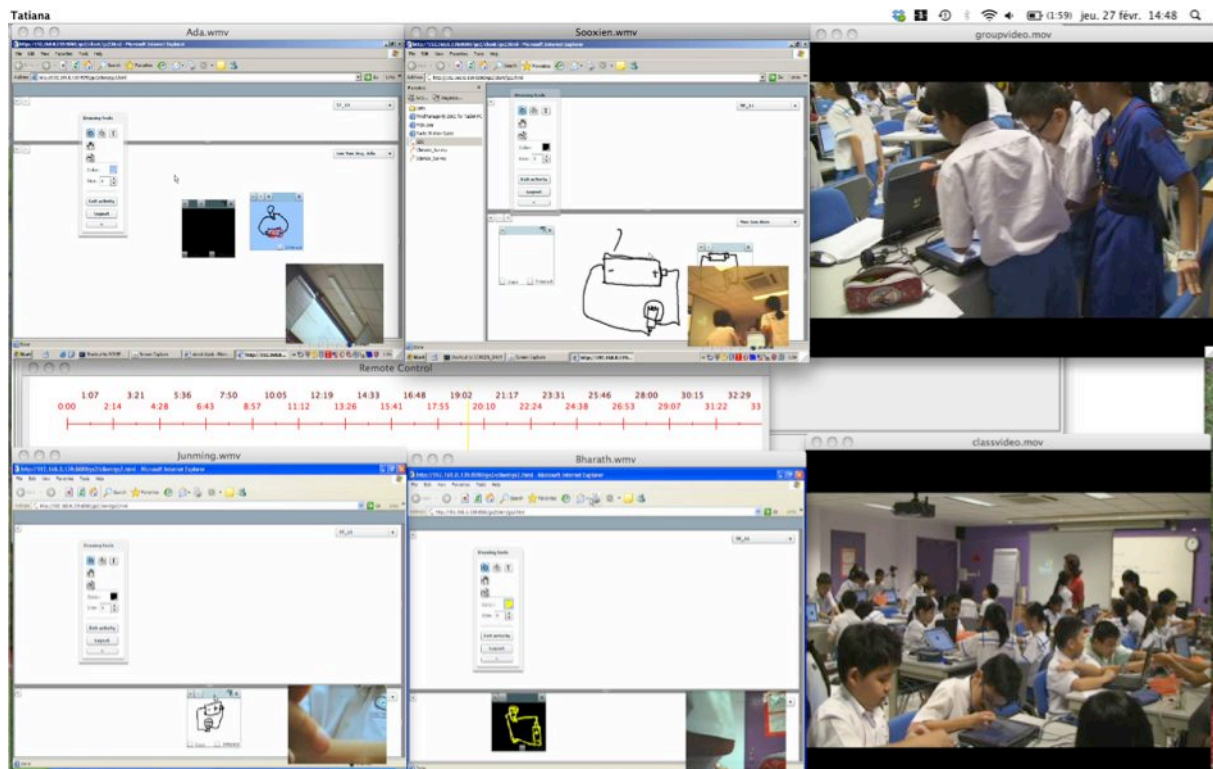


Figure 46: copie d'écran des 6 vidéos synchronisées sur Tatiana lors des analyses conduites dans le cadre du projet Productive Multivocality

Sur un support tel que la tablette tactile, il est aisé d'obtenir un recueil des productions écrites des élèves au fur et à mesure de leur élaboration. Il est donc envisageable de rejouer la construction d'un dessin. Toutefois, cet outil a contraint les types de dessins réalisables, à cause des difficultés à effectuer des tracés précis avec les stylets. Dans le cadre de cette prise de données, nous avons systématiquement travaillé avec le logiciel Tatiana. Nous suivis de manière synchrone l'avancement de chacun des élèves, les productions partagées⁶⁸, discutées, les points d'accord et de désaccord au sein du groupe en fonction des productions individuelles.

Quel que soit l'outil utilisé, il faut les productions écrites, verbales et gestuelles pour analyser comment les élèves et l'enseignant mobilisent et articulent les niveaux de modélisation, sur la base des registres sémiotiques et des modalités de communication à disposition.

Les outils techniques, associés à la mobilisation des outils d'analyse de mon cadre épistémico-sémiotique, sont une aide précieuse pour analyser les processus d'étude, mettre en évidence des difficultés récurrentes des élèves et des enseignants ainsi que catégoriser les formats de communication en lien avec les concepts physiques enseignés.

⁶⁸ Le logiciel utilisé par les élèves, GroupScribble, permettait aux élèves de disposer d'un espace privé, individuel pour dessiner leur réponse, d'un espace public dans lequel ils pouvaient faire glisser leur réponse et d'un espace de mutualisation (pour la classe), dans lequel ils pouvaient sélectionner les réponses produites par d'autres élèves.

3 Résultats sur les pratiques d'étude

Dans cette partie, je présente une relecture dans les termes de mon cadre épistémo-sémiotique des résultats d'analyses réalisées à partir des productions des élèves dans les projets DBR « énergie » et « collègue ». Certains des résultats présentés ont fait l'objet de publications spécifiques, d'autres sont des éléments que mes recherches ont mis au jour de manière plus ponctuelle et ont donné lieu à des adaptations des séances d'enseignement, et enfin, certains sont de nouvelles analyses réalisées à l'occasion de cette note de synthèse. Je profite de cette note de synthèse pour rassembler ces résultats dans l'objectif de construire de nouvelles perspectives de recherche ou d'interroger ces éléments au regard de mon cadre épistémo-sémiotique. Des éléments d'analyse issus de projets autres que ceux apparentés à la DBR seront parfois mobilisés afin d'étayer certaines interprétations. Je préciserai alors succinctement les modalités de recherche associées à ces projets.

Les résultats présentés sont organisés en cinq parties, en fonction des entités influençant les activités⁶⁹ de modélisation des élèves et les registres sémiotiques associés. Dans un premier temps, j'expose l'influence du rapport à l'expérimental et des activités de manipulation des objets. Puis je présente la manière dont les contenus des instructions données aux élèves orientent les activités de modélisation au cours des interactions. La troisième partie précise l'influence des registres sémiotiques fournis ou à élaborer sur ces activités de modélisation. Je montrerai dans la quatrième partie comment les connaissances issues d'autres disciplines, principalement les mathématiques, pèsent également sur la modélisation. Enfin, je terminerai cet exposé en donnant des résultats sur le suivi des trajectoires d'études individuelles au sein d'un groupe d'élèves afin de montrer comment les productions d'un élève peuvent infléchir les réponses d'un autre. Afin d'éviter des formulations trop lourdes, les principaux résultats sont exprimés volontairement de manière décontextualisée (en gras). Cette décontextualisation ne doit pas laisser croire à une généralisation abusive, toutes les analyses présentées ayant été conduites sur la base d'études de cas. La discussion de ces résultats au chapitre 7 sera l'occasion de les situer les uns par rapport aux autres, et plus généralement au regard d'autres recherches.

3.1 Le rôle de la manipulation des objets sur les activités de modélisation

Dans cette partie, après une brève présentation des objectifs du rapport à l'expérimental en classe de sciences, je dresse une synthèse des analyses se rapportant aux activités des élèves lors de la réalisation d'une expérience, de la collecte des données... Compte tenu de la nature des activités conduites par les élèves, je fais une synthèse en deux parties distinctes, la première étant consacrée au niveau du lycée, la deuxième à celui du collège.

3.1.1 Les objectifs de la manipulation pour l'apprentissage

Ainsi que je l'ai présenté dans le chapitre 3, le rapport à l'expérimental, fondateur du fonctionnement de la physique, est un élément clé dans la conception des situations d'enseignement en physique. L'hypothèse largement partagée par les praticiens et les chercheurs est que la manipulation des objets, l'observation d'une situation réelle ou simulée, accompagne l'apprentissage conceptuel. Pour les

⁶⁹ Pour rappel, le terme activité est utilisé dans cette note au sens commun, voir paragraphe 2.1.3, p. 150.

enseignants participant aux différents projets, il était essentiel de proposer aux élèves des situations dans lesquelles ces derniers manipulaient les objets pour visualiser des événements, mesurer, découvrir leur fonctionnement, leur composition, ou acquérir des savoir-faire quant à leur intégration et leur utilisation. Cette phase de manipulation a également été étudiée par Coquidé (1998) avec des élèves de primaire, comme un mode didactique de pratique expérimentale. Dans le cas du mode de familiarisation pratique il s'agit « *de familiariser l'élève à des objets ou des phénomènes, de l'inciter à un questionnement, de constituer un référent empirique. Les activités peuvent lui faire acquérir des savoir-faire préalables ou s'approprier des techniques d'investigation (instruments et procédures). L'élève expérimente "pour voir" ; il explore et contrôle peu à peu ses actions ; il apprend à maîtriser des pratiques* » (ibid. p. 113). Si ce mode didactique est décrit comme correspondant à « *l'initiation scientifique du jeune enfant* », il ne concerne pas seulement l'enseignement primaire, puisque les élèves sont conduits, tout au long de leur scolarité, à découvrir d'autres domaines scientifiques, et donc de nouveaux objets et techniques. Coquidé (1998) décrit deux autres modes. Le mode d'investigation empirique articule le mode de familiarisation pratique et les élaborations intellectuelles lors de projets ou de démarches d'investigation. Ce mode vise à initier les élèves au raisonnement scientifique, l'aider à mobiliser des instruments dans le cadre d'une investigation relativement ouverte. Enfin, le mode d'élaboration théorique permet d'articuler le référent empirique et la conceptualisation qui en est faite. D'autres auteurs, comme Millar et al. (2002), ont caractérisé ce qui se joue à travers le rapport à l'expérimental en catégorisant les objectifs d'apprentissage. Ainsi, réaliser des travaux pratiques peut avoir pour objectif : l'identification des objets et phénomènes afin de se familiariser avec ceux-ci, l'apprentissage d'un fait, d'un concept, d'une relation ou d'une théorie ou d'un modèle. Le premier objectif se rapproche du mode de familiarisation pratique de Coquidé. Même si les travaux pratiques ont subi de fortes critiques quant à leur efficacité pour faire apprendre (Hodson, 1990), il n'était pas envisageable pour les enseignants, au collège comme au lycée, lors de la conception des séances d'enseignement, de ne pas accorder de temps aux élèves pour découvrir le matériel mis à disposition et son fonctionnement. Dans cette partie, je m'intéresse donc à la phase de manipulation des objets, au cours de la collecte d'informations qualitatives et quantitatives, avant que les élèves ne soient incités à expliquer l'expérience dans les termes du modèle étudié. En effet, il est apparu que la manipulation des objets, dispositifs expérimentaux, tant du point de vue des consignes préparées à l'attention des élèves que du temps imparti à cette phase dans les séances de classe prenait une place conséquente au regard d'autres consignes plus ciblées sur l'interprétation des résultats. Il est donc fondamental d'analyser ce qui se joue dans cette phase du point de vue de la compréhension du fonctionnement de la physique. Aussi, si l'importance de la phase de manipulation des objets et d'observation de la situation pour apprendre n'est plus à démontrer, mon cadre épistémo-sémiotique permet d'étudier les activités de modélisation mettant en relation les objets étudiés et les concepts, lois afin d'expliquer ou prévoir leur fonctionnement.

3.1.2 Les activités de modélisation et les registres sémiotiques mobilisés dans la phase de manipulation au lycée

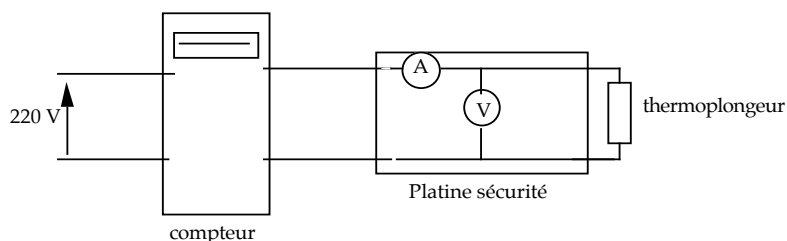
Dans le cadre du projet « énergie », j'ai étudié deux situations de travaux pratiques en première S. L'une concernait l'introduction expérimentale du concept de puissance, l'autre portait sur une étude de la chute libre en termes d'énergies cinétique et potentielle. Je me focaliserai ici uniquement sur la situation d'introduction de la puissance, du fait que dans la deuxième situation, les enseignants avaient soit mobilisé des dispositifs de type EXAO pour collecter les données avec les élèves, soit fourni un tableau de mesures avec un descriptif de la situation de recueil. Dans les deux cas, la situation expérimentale était au mieux évoquée, les élèves n'avaient pas la possibilité de manipuler les dispositifs expérimentaux. Pour analyser les transcriptions des interactions entre les élèves du point de vue des

activités de modélisation, j'ai mobilisé les critères d'analyses présentés dans le chapitre 5. De plus, il semble délicat de produire des interprétations sur les activités de modélisation lors des phases de manipulation, sans avoir connaissance des activités liées aux autres phases des séances analysées. J'ai donc mis en parallèle des analyses produites lors des autres phases pour faire apparaître des similitudes entre les différentes phases de la séance ou des spécificités de la phase de manipulation.

Le TP « puissance » a pour objectif de faire prendre conscience aux élèves, après examen des consignes, du matériel et des résultats expérimentaux (mesures), de la nécessité d'introduire une nouvelle grandeur reflétant la vitesse de transfert d'une quantité d'énergie. Les mesures de la tension et de l'intensité devaient aider les élèves à établir une relation avec le concept de puissance présenté au collège. Cette activité voulait aider les élèves à différencier les concepts d'énergie et de puissance. L'introduction du concept de puissance se situe dans une nouvelle étape de la modélisation des phénomènes énergétiques introduisant des aspects quantitatifs. Le TP, tel qu'il a été présenté aux élèves dans la première année du projet, est globalement organisé en cinq phases (notées *activités* dans le texte donné aux élèves)⁷⁰, comme indiqué ci-dessous.

Nous nous proposons de chauffer de l'eau à l'aide d'un thermoplongeur (ou d'un appareil analogue) et de faire une analyse énergétique de la situation. Nous disposons pour cela : d'un thermoplongeur fonctionnant sur le 220 V du secteur, d'un récipient contenant une masse connue d'eau, d'un agitateur et d'un thermomètre, d'un compteur E.D.F.⁷¹ : chaque tour de disque correspond à une quantité d'énergie indiquée sur l'appareil et exprimée en Wh/tour (1 Wh = 3600 J), d'un chronomètre, d'un ampèremètre et d'un voltmètre, de leurs cordons et d'une platine permettant de les brancher sans risques.

Activité N° 1 : faire le montage avec tous les appareils de mesures selon le schéma ci-dessous :



Procéder aux mesures (avant de commencer les mesures, amener l'index du disque devant le repère en faisant fonctionner un bref instant le thermoplongeur). Déclencher le chronomètre au moment du branchement définitif du thermoplongeur, noter la température initiale et présenter les résultats dans le tableau suivant ci-dessous.

Noter $U =$ V et $I =$ A

⁷⁰ L'ensemble des textes des activités développées au sein du projet « énergie » et les analyses conduites sur la réalisation de ces séances est présenté dans un ouvrage collectif « introduction à l'énergie, contenus et compléments didactiques », CRDP de Lyon, 1998.

⁷¹ Les compteurs utilisés dans ce TP sont des compteurs EDF à disque. Les compteurs sont caractérisés par une constante indiquée sur l'appareil. Chaque compteur peut avoir une constante différente. Ils indiquent la quantité d'énergie transférée pour un tour. En fonction de la puissance, le disque tournera plus ou moins vite. Pour prendre les mesures, les élèves devront compter le nombre de tours du disque et repérer le temps à chaque tour.

n (tours)	E (Wh)	E (kJ)	t (min et s)	t (s)	θ (°C)
0	0	0	0	0	$\theta_o =$
1					
...					
10					$\theta_f =$

Activité N° 2 : pour cette expérience, on souhaiterait pouvoir prévoir la quantité d'énergie utilisée au bout d'une durée quelconque sans avoir besoin de faire toutes les mesures. Pour cela, chercher une formule mathématique qui permettrait de relier la quantité d'énergie transférée E et la durée du chauffage t. On note $E = f(t)$ cette formule. On utilisera les unités du système international.

Activité N° 3 : dans cette relation, vous avez dû introduire une nouvelle grandeur. Trouvez un nom ou une expression qui traduise la signification de cette grandeur.

Activité N° 4 : construire une chaîne énergétique "pendant" représentant la situation de chauffage (on pourra négliger la quantité d'énergie transférée du thermoplongeur vers l'environnement devant les autres quantités mises en jeu). Ecrire une phrase pour préciser où on pourrait y faire figurer la grandeur que vous venez de découvrir. Faire figurer cette grandeur.

Activité N° 5 : de quels éléments qui composent le montage et qui sont représentés sur la chaîne dépend cette grandeur ? Que faudrait-il faire concrètement pour modifier sa valeur ? Les indications des appareils de mesures apportent-elles une confirmation à votre réponse ? Justifier.

~~~~~

L'énergie est présente dans cette expérience en tant que grandeur première quasiment directement mesurable grâce à un compteur EDF à disque<sup>72</sup>. La relation mathématique entre l'énergie et le temps est simple, puisqu'il s'agit d'une relation de proportionnalité, où la puissance est le coefficient de proportionnalité. La puissance est ainsi introduite dans le cadre d'une relation mathématique construite à partir des données expérimentales. Pour éviter que la puissance ne demeure un simple coefficient mathématique, ses significations du point de vue de l'interprétation physique de la situation et de sa représentation dans le modèle énergétique sont demandées à l'élève.

### Les activités de modélisation lors des phases de manipulation

Dans cette séance, la phase de manipulation correspond au montage et la prise de mesures (activité 1). L'analyse conduite au cours de ma thèse visait à comprendre ce qui se joue dans cette phase de manipulation et de mesure pour la compréhension des concepts en jeu et de leur articulation : les élèves mesurent le temps, l'énergie, la tension et l'intensité, ils peuvent ensuite construire le concept de puissance et établir  $P = E \times t = U \times I$ . Du fait de l'importance accordée à cette phase de manipulation

---

<sup>72</sup> Les compteurs EDF utilisés n'étaient pas tous identiques, chaque tour de disque étant caractérisé par une quantité d'énergie transférée pouvant différer d'un compteur à l'autre. Cette caractéristique était indiquée sur les compteurs. Les élèves devaient mesurer le temps mis pour chaque tour, et multiplier le nombre de tours par la caractéristique du compteur utilisée pour trouver la quantité d'énergie associée à chaque temps mesuré.



et de mesure par les enseignants et du temps passé par les élèves à construire le montage et recueillir les données quantitatives au regard des autres activités à mener pour ce TP, j'ai élaboré une représentation pour comparer les niveaux de modélisation mis en œuvre par les élèves et les relations établies entre les différents niveaux. Le Tableau 7 fournit une synthèse des analyses conduites lors de ma thèse (Bécu-Robinault, 1997a) sur les interactions entre les élèves au cours cette séance de TP, et indique les relations internes et entre niveaux de modélisation établies par au moins 80% des groupes d'élèves suivis.

**Tableau 7: présentation synthétique des niveaux de modélisations mobilisés dans au moins 80% des propositions (en vert) et des relations établies par tous les groupes (en bleu et rouge).**

|                                             | Niveaux mobilisés       | Théorie | Modèle physique | Modèle mathématique | Mesure | Objets et événements |
|---------------------------------------------|-------------------------|---------|-----------------|---------------------|--------|----------------------|
|                                             | Relations entre niveaux |         |                 |                     |        |                      |
|                                             | Relations internes      |         |                 |                     | X      |                      |
| Activité 2<br>Relation entre E et t         | Niveaux mobilisés       | Théorie | Modèle physique | Modèle mathématique | Mesure | Objets et événements |
|                                             | Relations entre niveaux |         |                 |                     |        |                      |
|                                             | Relations internes      |         | X               |                     |        |                      |
| Activité 3<br>Nom de la grandeur            | Niveaux mobilisés       | Théorie | Modèle physique | Modèle mathématique | Mesure | Objets et événements |
|                                             | Relations entre niveaux |         |                 |                     |        |                      |
|                                             | Relations internes      |         | X               |                     |        |                      |
| Activité 4<br>Représentation de la grandeur | Niveaux mobilisés       | Théorie | Modèle physique | Modèle mathématique | Mesure | Objets et événements |
|                                             | Relations entre niveaux |         |                 |                     |        |                      |
|                                             | Relations internes      |         | X               |                     |        |                      |
| Activité 6<br>Modification de la situation  | Niveaux mobilisés       | Théorie | Modèle physique | Modèle mathématique | Mesure | Objets et événements |
|                                             | Relations entre niveaux |         |                 |                     |        |                      |
|                                             | Relations internes      |         | X               |                     |        |                      |

Cette présentation synthétique de l'ensemble des analyses permet de visualiser et comparer les traitements des activités selon les niveaux de modélisation mis en relation par les élèves.

Ainsi, il apparaît que l'activité relative au montage et aux mesures est la plus riche quant au nombre de niveaux de modélisation mobilisés et de relations établies entre ces niveaux<sup>73</sup> (Bécu-Robinault, 1997b[1] ; 2004[4]). A l'exception du niveau de la théorie, par ailleurs jamais mobilisé par l'ensemble

<sup>73</sup> Pour rappel, la formulation des principaux résultats (en gras) est volontairement décontextualisée, ce qui ne doit pas laisser entendre une généralisation sur la base des seules études de cas présentées.

des groupes pour traiter les activités<sup>74</sup>, tous les niveaux sont convoqués et mis en relation dans les propositions :

- Exemple de relation entre les niveaux du modèle physique et des objets et événements :

*Jane : Pourquoi il avance. Mais pourquoi il avance (le compteur tourne, alors qu'il n'est pas branché)*

*Noémie : c'est parce qu'il y a ça*

*Jane : Mais y a pas d'courant qui arrive dedans*

Ces mises en relation visent à expliquer les phénomènes observés, sur la base des connaissances scientifiques, ou naïves quand les connaissances scientifiques ne sont pas disponibles.

- Exemple de relation entre les niveaux du modèle mathématique et de la mesure :

*Marine : ils disent qu'il faut lire sur l'appareil donc tu regardes combien ça fait*

*Paul : 4 wattheures par tour*

*Marine : 4 wattheures et ben voilà tu multiplies par 4*

*Paul : ouais 4 fois 3 ... 12 ... 4 fois 8 ... 24*

Dans ce cas, le modèle mathématique va être convoqué pour traiter les données recueillies, sans être contraint par les concepts ou les phénomènes auxquels les valeurs mesurées renvoient.

- Exemple de relations entre les objets et événements et la mesure :

*Cédric : parce qu'elle (la température) a augmenté elle va commencer à diminuer c'est le temps que ça refroidisse.*

Ces relations donnent un sens qualitatif aux informations recueillies, en lien avec des observations qualitatives, le plus souvent non instrumentées.

Au cours des activités suivantes, les élèves mobilisent principalement deux niveaux qu'ils mettent en relation. Ainsi, lorsque les élèves cherchent à établir une relation entre l'énergie et le temps, ce sont les niveaux des modèles mathématique et physique qui sont mobilisés et mis en relation, de même lorsque les élèves cherchent à donner un nom à cette grandeur. Cette recherche de nom en lien avec les traitements mathématiques opérés sera discutée au paragraphe 3.4.1 de ce chapitre. Les deux dernières activités, incitent les élèves à articuler le modèle physique et les objets et événements. L'activité de représentation de la chaîne énergétique conduit les élèves à attribuer un rôle aux éléments du montage en relation aux transferts et aux transformations énergétiques. Lors de la dernière activité, les élèves donnaient une signification de la puissance non pas par rapport à un élément isolé de la chaîne mais bien par une mise en relation entre deux systèmes, en l'occurrence, le thermoplongeur et l'alimentation électrique. Les élèves ne disposent pas forcément de connaissances suffisantes pour formuler une réponse exacte à cette question en termes d'objets : du fait que la modification du réservoir initial EDF peut ne pas paraître envisageable aux élèves, les réponses attendues étant davantage liées aux grandeurs physiques caractérisant l'alimentation électrique, comme la tension ou l'intensité, c'est à dire des réponses portant sur les mesures de ces grandeurs. Cette activité, appelant un retour sur la situation expérimentale en fin d'activité, n'est pas habituelle en TP, les élèves devant plus classiquement terminer avec une conclusion dans les termes du modèle physique. De fait, à la fin de l'activité précédente, les élèves sont dans un traitement de l'information qui relève du modèle

---

<sup>74</sup> Cela n'est pas nécessairement le cas pour tous les TP analysés, comme je le présenterai ultérieurement.

physique puisqu'ils ont représenté la grandeur reliant l'énergie et le temps sur la chaîne énergétique. Cela questionne ce qui aide, dans la consigne fournie, à articuler le niveau du modèle à celui des objets, événements ou de la mesure.

Il ressort de l'analyse des interactions que les mises en relation entre les deux niveaux « modèle physique » et « objets et événements » sont associées à l'utilisation du schéma de la chaîne énergétique. Ainsi, **le registre sémiotique schéma aide à l'articulation des niveaux du modèle physique et des objets et événements.**

Le niveau de la mesure n'a pas été mis en œuvre par tous les groupes, même si certains élèves le mobilisent de manière ponctuelle. L'analyse des interactions montre que ces références à la mesure interviennent suite aux propositions de modifications des objets de l'expérience. Elles correspondent ainsi le plus souvent à des procédures de vérification des assertions précédentes au cours desquelles les élèves ont émis des doutes sur le matériel manipulé. Elles font intervenir des savoirs enseignés en électrocinétique et notamment le calcul de la puissance en fonction de la tension et de l'intensité. Ces mises en relation avec la mesure ne sont donc pas spontanées dans une tâche autre que celle du relevé des informations quantitatives, lors de l'activité de manipulation. La référence aux mesures intervient seulement lorsque la situation matérielle est modifiée : **le rapport à la mesure est assujéti à la manipulation des objets à disposition dans la situation expérimentale.** Par ailleurs, même si l'analyse *a priori* indiquait qu'il était possible de répondre en s'appuyant sur les mesures des grandeurs physiques, ce sont les objets que les élèves prennent en considération. Il semble donc que les élèves construisent plus facilement du sens au concept de puissance à partir des objets qu'à partir des mesures réalisées.

En synthèse, ces analyses révèlent que le poids *a priori* accordé à la phase de manipulation trouve une justification au regard du nombre de niveaux de modélisation que les élèves mobilisent, et des relations établies entre ces niveaux. Pour autant, une fois cette phase de manipulation et de prises de mesures achevée, les élèves se contentent de traiter les informations au niveau des modèles mathématique et physique, en ne faisant presque plus de référence explicite à la situation expérimentale, et encore moins à la prise de mesure. Il faut que les consignes incitent à un retour vers la situation expérimentale pour que le niveau des objets et des événements soit à nouveau sollicité pour donner du sens aux éléments du modèle physique.

### Les registres sémiotiques mobilisés lors des phases de manipulation

Les registres sémiotiques dans les instructions pour la manipulation ont également une influence sur les caractéristiques des objets considérées par les élèves. Les analyses réalisées sur la première version de ce TP montraient que les élèves peinaient à donner une signification à la grandeur puissance en relation avec l'énergie. En effet, deux des grandeurs mesurées (tension et intensité) avaient déjà été étudiées dans un cours précédent, et le montage proposé (avec un compteur EDF, un voltmètre, un ampèremètre) via sa schématisation sur la feuille de TP incitait les élèves à mobiliser légitimement les connaissances relatives à ces grandeurs électriques. Des modifications ont été apportées pour la deuxième année du projet, afin que les élèves soient placés d'emblée dans le cadre d'une expérience traitant de l'énergie. La consigne fournissait alors les schémas des chaînes énergétiques « pendant » (Figure 47 en haut) et « initial - final » (Figure 47 en bas, ce sont les niveaux d'énergie transférés qui sont représentés dans les réservoirs) en lieu et place du schéma du circuit électrocinétique. Les élèves devaient donc construire le montage d'après les schémas des chaînes énergétiques.

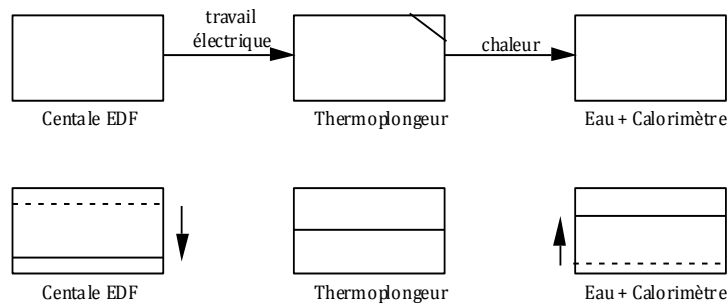


Figure 47: les schémas des chaînes énergétiques fournies aux élèves pour la construction du montage

Les analyses des comptes rendus de ce TP modifié ont montré que les élèves représentaient fréquemment la puissance sur la chaîne « initial - final ». Lors d'entretiens post-expérimentation, les élèves ont expliqué que la quantité d'énergie transférée, indiquée par la différence des niveaux d'énergie dans les réservoirs et les flèches, figure sur la chaîne initial – final (c'est la différence de niveaux entre les pointillés et la ligne pleine). Cette indication presque quantitative les a incités à représenter la grandeur « puissance », calculée sur la base de cette quantité d'énergie transférée, sur cette même chaîne. Ce choix ne permet pas aux élèves de construire le concept de puissance comme une grandeur d'interaction entre deux systèmes (le secteur EDF fournit de l'énergie au thermoplongeur, sous la forme de travail électrique), liée au débit d'énergie. En effet, les transferts, c'est à dire les modes par lesquels l'énergie est transférée, n'apparaissent pas sur la chaîne initial-final. De ce fait, cette représentation, par ailleurs non nécessaire à la compréhension du montage à réaliser, a été ensuite supprimée. Ces analyses, conduites sur les modifications successives des textes des activités, indiquent que si la manipulation est très riche du point de vue des activités de modélisation, elle est aussi influencée par les contenus des registres sémiotiques, faisant implicitement référence à des modèles spécifiques, et donc incitant les élèves à prélever des informations pertinentes au regard de ces modèles. Ainsi, **les registres sémiotiques mobilisés dans la consigne, reflétant des contenus spécifiques à un modèle physique, influencent le type d'actions que les élèves mènent sur les objets ainsi que l'interprétation des événements observés.**

### 3.1.3 Les activités de modélisation et les registres sémiotiques mobilisés dans la phase de manipulation au collège

A la suite des résultats obtenus lors du projet « énergie », une attention toute particulière a été portée à la phase de manipulation et aux représentations sémiotiques associées dans les deux projets « Démarche » et « Evaluation » au collège. Ces composantes sont d'autant plus cruciales que pour de nombreux élèves, l'enseignement de physique en classe de cinquième est le premier contact avec cette discipline et les objets à étudier dans le cadre scolaire. Il était donc indispensable de donner à voir aux élèves, dès les premières activités, ce qu'est le mode de fonctionnement de cette nouvelle discipline.

La première version des activités élaborées concernant l'électricité en cinquième proposait, en guise d'activité introductive, une phase de familiarisation pratique. Au cours de cette activité, les élèves avaient pour consigne, après avoir fait un dessin montrant comment faire briller la lampe (sans avoir touché le matériel sur la table), de se débrouiller pour la faire briller avec le matériel à disposition. Ces deux activités combinées avaient initialement pour objectif de mettre en évidence les difficultés des élèves à identifier les deux bornes de la lampe et de la pile et à construire un circuit électrique fermé. La manipulation était considérée comme réussie si elle produisait l'effet attendu. Les élèves étaient alors incités à produire un autre dessin correspondant au montage permettant à la lampe de briller.

Les dessins à produire relèvent de ce que Vezin (1986) nomme des schémas descriptifs, en opposition aux schémas explicatifs. Les schémas descriptifs s'appuient sur l'apparence des objets pour en sélectionner des caractéristiques. « *Si le schéma descriptif favorise la compréhension imagée, la reconnaissance d'une caractéristique dans un objet, le schéma explicatif peut aider à la compréhension de l'interaction de principes lorsque le besoin est davantage de comprendre une interaction que de s'appuyer sur une représentations imagée* » (Ibid., p. 76). Un schéma de type explicatif fournit une meilleure compréhension des liens entre des énoncés de types différents, ici un texte et la combinaison des gestes à réaliser pour que la lampe brille. Toutefois, un schéma explicatif s'appuie sur un « *langage figuratif de spécialité qu'utilisent entre elles les personnes d'une même discipline ou d'un même domaine de recherche [...], habituées à une structuration des connaissances à partir des principes sans nécessiter une représentation imagée prenant appui sur l'apparence* » (Ibid., p. 76). S'agissant de la première activité en électricité au collège, les élèves ne disposent alors d'aucune langue commune pour communiquer sur le fonctionnement d'un circuit. Cette langue sera introduite ultérieurement comme un ensemble de normes à respecter dans la construction d'un schéma ou la classification des éléments d'un circuit (conducteur, isolant, générateur, récepteur,...). Dans cette activité l'objectif est, à travers ces premiers dessins, ou schémas descriptifs selon Vezin (1986), d'aider les élèves à repérer les caractéristiques saillantes des objets à manipuler (Lund & Bécu-Robinault, 2010b[8]).

Les observations des élèves en train de dessiner indiquaient deux types de difficultés. La première tient à l'absence de perception des caractéristiques des objets qui ont du sens du point de vue de la physique. Ainsi, la borne positive de la pile ronde (Figure 48 à gauche) est facilement identifiable car proéminente, alors que la borne négative l'est moins, car elle ne débord pas du boîtier. Cette caractéristique est également une difficulté lorsque l'on dessine la pile ronde, puisqu'il suffit d'un rectangle surmonté d'un plus petit si l'on fait abstraction de la perspective (Figure 48 à droite).



Figure 48: la position des deux bornes sur une pile ronde et le dessin associé

La même difficulté émerge pour la lampe (Figure 49) : les élèves parviennent le plus souvent à identifier la borne « culot » (vissable sur un socle<sup>75</sup>), mais plus difficilement la borne « plot ».

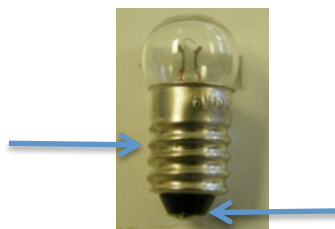


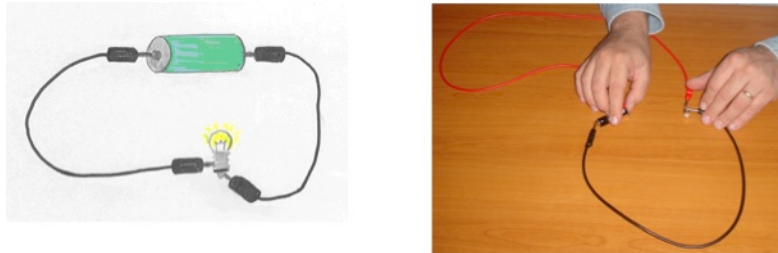
Figure 49: la position des deux bornes sur une lampe

Les bornes n'étant pas aisément identifiées, les élèves n'en auront que plus de mal à les représenter pour les connecter ensuite. Ainsi, **lorsque le registre sémiotique utilisé, ici le dessin, ne sélectionne pas une caractéristique matérielle des objets, cette caractéristique ne sera**

<sup>75</sup> Dans la vie quotidienne, on associe fréquemment le fait qu'une lampe ne brille pas car elle est mal vissée.

**pas utilisée dans les expériences conduites.** Par voie de conséquence, on peut supposer que cette caractéristique ne sera pas intégrée au modèle en cours d'élaboration.

La deuxième difficulté tient à la manipulation proprement dite. A supposer que les élèves l'aient dessinée correctement (Figure 50 à gauche), il n'est pas aisé, même à deux élèves et donc quatre mains, de réaliser l'expérience en tenant la pile, la lampe et les quatre extrémités de fils de connexions (Figure 50 à droite, à deux mains « expertes » pour ne pas trop masquer les connexions établies).



**Figure 50: un dessin et une manipulation permettant de faire briller une lampe avec une pile ronde**

Ces difficultés sont clairement apparues pour un groupe d'une classe où nous avons enregistré l'intégralité de la séance d'électrocinétique. Les élèves avaient produit un dessin dans lequel les deux bornes de la lampe n'étaient pas identifiées (reproduction Figure 51 à gauche). Malgré quelques réussites dues au hasard, pendant près de 20 minutes ils ne validèrent ni n'invaliderent leur dessin (Figure 51, au centre) dans l'impossibilité qu'ils furent de coordonner leurs gestes réciproques et de les mettre en relation avec les effets produits et le dessin préalable. La réaction de l'un des élèves « c'est magique » alors que la lampe brille au cours de l'une des tentatives, confirme que les élèves ne sont pas en mesure d'expliquer pourquoi la lampe a brillé. Cette analyse illustre la **difficulté des élèves à convertir le registre sémiotique « dessin » en modalité sémiotique « geste »**.



**Figure 51: la reproduction du dessin réalisé par les élèves (à gauche), la manipulation associée dans le groupe (au centre) et la manipulation présentée à l'enseignant (à droite)**

Cette difficulté n'apparaît pas forcément à l'enseignant, qui s'appuie uniquement sur un résultat d'expérimentation qu'il a perçu au cours de son passage vers ce groupe. Ainsi, lorsque l'enseignant fait le point avec ce groupe en fin de séance (Figure 51, à droite), il constate que les élèves n'ont toujours pas identifié la deuxième borne de la lampe, même si les manipulations hasardeuses ont permis d'obtenir brièvement l'effet attendu.

*Enseignant : non non non même tu peux le faire à la main il va falloir relier*

*Elève: ici*

*P: non pas ici tout à fait ben on verra un peu plus tard qu'il ne faut pas que ça soit au même endroit de l'ampoule il faut que ça soit à cet endroit de l'ampoule*



Cette analyse, qui a fait l'objet d'une communication dans un colloque international (Lund & Bécu-Robinault, 2010b[10]) a montré que le fait de **fonder la manipulation sur un registre sémiotique du type dessin ne suffit pas à aider les élèves à construire du sens aux objets manipulés, en particulier quand le dessin produit n'est pas conforme au savoir scolaire**. A la différence de la séance étudiée au lycée (paragraphe précédent 3.1.2), les élèves ne disposaient ici d'aucune connaissance scientifique préalable pour identifier les différents composants d'un circuit électrique et les conditions de circulation du courant. Même si un dessin était demandé, il s'agissait donc d'une manipulation « libre », non outillée par des savoirs scientifiques.

En synthèse de cette partie, la phase de manipulation aide les élèves à établir des relations entre les différents niveaux de modélisation. Les activités de représentations participent à la reconnaissance des éléments saillants des objets qui feront l'objet de l'enseignement. Cette phase ne suffit pas pour élaborer un modèle physique, en particulier quand les élèves ne disposent pas au préalable d'un ensemble suffisant de connaissances pour reconnaître la fonction des objets manipulés. Il est essentiel qu'il y ait une mobilisation conjointe des connaissances scientifiques, relevant du modèle en jeu, et des représentations sémiotiques, pour donner du sens aux objets manipulés et aux phénomènes étudiés.

### 3.2 Les instructions données aux élèves et les activités de modélisation

Dans cette partie, je reprends des analyses conduites lors des différents projets DBR sur l'influence des instructions données aux élèves sur les activités de modélisation au cours des interactions. En effet, si les élèves doivent établir des relations entre les différents niveaux de modélisation pour construire une signification physique aux concepts et expliquer les phénomènes dans les termes des modèles physiques en jeu, il va de soi que la construction de ces relations dépend des consignes qui leur sont données au fil de l'activité. Dans un premier temps, je reviens sur une analyse conduite au cours de ma thèse sur les liens existant entre les consignes écrites et les contenus des interactions entre élèves. Les instructions fournies aux élèves pouvant être implicitement contenues dans la situation proposée, je reprendrai ensuite quelques résultats sur les éléments de consignes en lien avec les activités de modélisation.

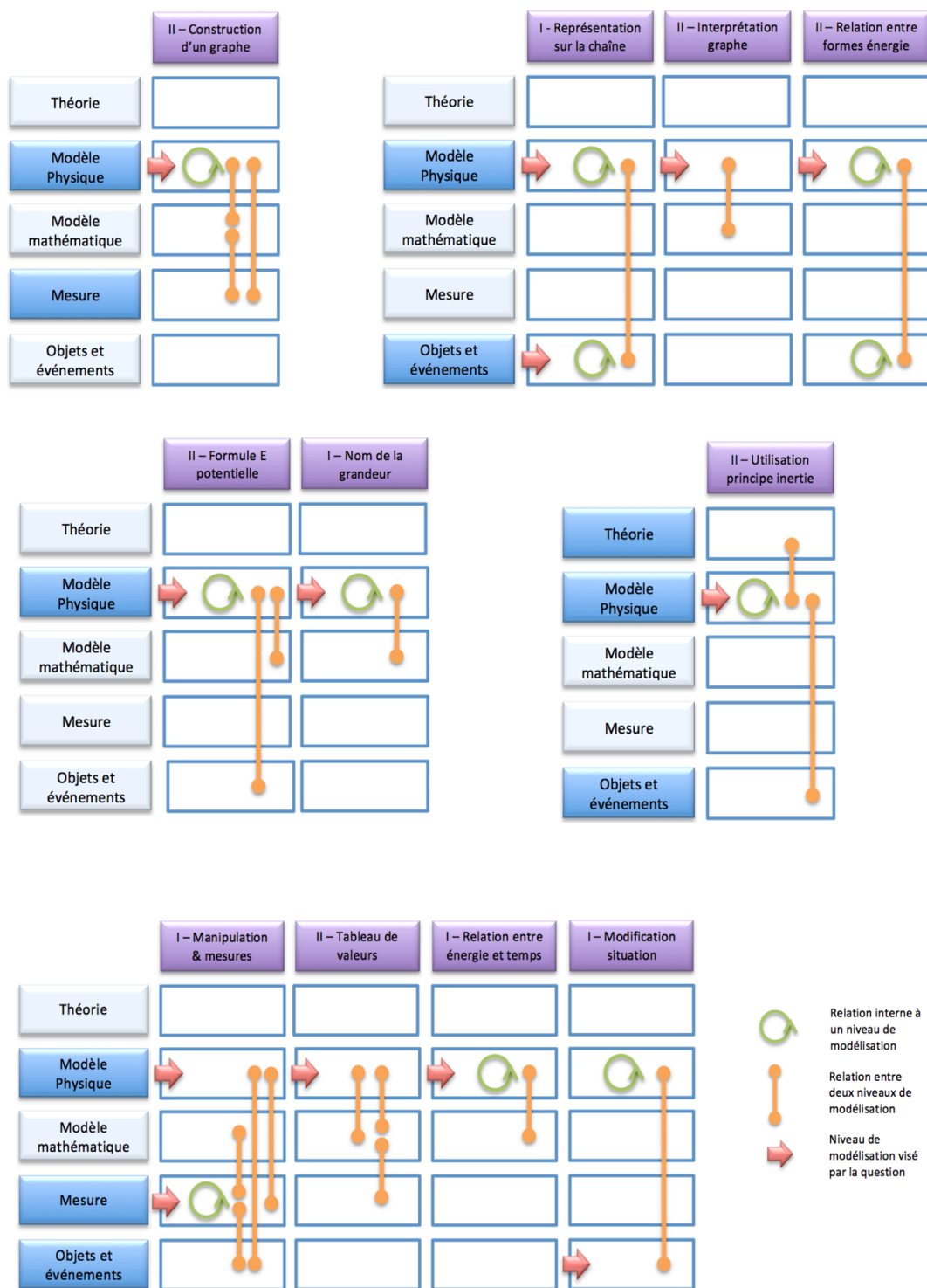
#### 3.2.1 Les consignes écrites pour légitimer le recours au niveau du modèle physique

Pour étudier le rôle des consignes, j'ai fait une analyse *a priori* systématique des informations, en termes de niveau de modélisation contenus explicitement dans les consignes écrites, puis une analyse des niveaux de modélisation mobilisés par les élèves lors de la résolution des tâches (Bécu-Robinault, 1997a ; Bécu-Robinault, 1997b[1] ; Bécu-Robinault, 2002[3] ; Bécu-Robinault, 2004[4]). J'ai également considéré les relations entre les niveaux à utiliser pour satisfaire la consigne, et les relations effectuées par les élèves. Les deux analyses ont ensuite été comparées en regroupant les activités dont les consignes mettaient en jeu des niveaux de modélisation identiques (en Figure 52). Ces analyses ont été réalisées pour toutes les questions (intitulés courts fournis en première ligne) des deux TP (puissance, TP référencé par I dans les schémas ci-dessous, énergies potentielle et cinétique, TP indiqué par II)<sup>76</sup>.

---

<sup>76</sup> le premier est celui concernant l'introduction du concept de puissance décrit plus haut (paragraphe 3.1.2., p. 162) Le deuxième était un TP dédié à l'étude de la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique lors d'une chute libre et de la conservation de l'énergie mécanique. Les élèves devaient : a) compléter le tableau de valeurs et calculer la valeur de l'énergie cinétique ; b) construire les graphes ( $d = f(t)$  ;  $v = f(t)$ ) ; c) interpréter les graphes (variation de la vitesse en chute libre ;





**Figure 52 : les niveaux de modélisation dans les consignes (bleu à gauche), dans les réponses attendues (flèches rouges) et lors des interactions en classe (traits et cercles). Ne sont représentées sur cette figure que les mises en relation entre niveaux de modélisation effectuées par au moins la moitié des groupes.**

d) utiliser le principe d'inertie pour expliquer le résultat ; e) trouver une relation entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle ; f) trouver l'expression de l'énergie potentielle.

La Figure 52 résume les résultats des analyses réalisées au cours de ma thèse (Bécu-Robinault, 1997a ; Bécu-Robinault, 2002[3]) et synthétisées à l'occasion de cette note de synthèse :

- L'analyse des niveaux de modélisation dans les questions adressées aux élèves (en bleu). Cette analyse a été conduite sur la base des instructions écrites fournies aux élèves pour réaliser leurs TP. Je n'ai relevé que les niveaux de modélisation explicités par les termes utilisés.
- Les niveaux de modélisation à utiliser pour fournir la réponse attendue sont représentés par une flèche rouge. Par exemple, si on leur demande les objets à modifier pour faire varier la valeur de la grandeur puissance (I.4), les objectifs relèvent à la fois du modèle physique et des objets et événements.
- Les relations entre niveaux de modélisation établies par au moins la moitié des groupes d'élèves suivis (relations interne à un niveau ou entre deux niveaux de modélisation).

Selon cette analyse, toutes les activités proposées aux élèves ciblent des objectifs relatifs au modèle physique, sauf pour l'activité 5 du TP « puissance » où il est demandé de modifier les éléments matériels du montage. Pour le TP « énergie cinétique, énergie potentielle », toutes les activités ont pour objectif le modèle physique. Cette uniformité dans les objectifs des consignes ne favorise pas les relations entre les différents niveaux de modélisation. Il est probable que cela incite les élèves à inférer un contrat didactique sur le niveau de modélisation à expliciter dans la réponse (le modèle physique), et donc à amoindrir la légitimité de la place des objets événements et mesures dans les processus d'élaboration de ces réponses. Par ailleurs, cela pose aussi la question du rôle des connaissances quotidiennes, en lien avec des modèles communs ou naïfs, dans les discussions entre élèves.

L'analyse des niveaux de modélisation mis en relation par les élèves révèle que ces derniers ne se contentent pas seulement de mettre en œuvre des niveaux conformes à ceux des objectifs de la question ; ils mettent également en jeu, au fil des interactions, des niveaux de modélisation qui sont le plus souvent ceux exprimés explicitement dans la question qui leur est adressée. Ainsi, la réponse produite relève des niveaux de modélisation explicités dans les questions qui sont éventuellement mis en relation. Seul le modèle mathématique est spontanément mis en relation avec d'autres, pour exprimer la formule de l'énergie potentielle, donner un nom pour la grandeur reliant l'énergie et le temps, pendant la phase de manipulation et de mesure, ou lors du tracé et de l'interprétation du graphe. Le statut particulier de ce niveau de modélisation sera étudié en paragraphe 3.4.1 de ce même chapitre, p. 156. Ainsi, **plus les consignes s'appuient sur une variété de niveaux de modélisation, plus les élèves mobiliseront et articuleront des niveaux distincts aux cours de leurs interactions pour produire une réponse.**

Puisque les élèves établissent des relations entre les niveaux de modélisation explicités dans la question, si l'on souhaite qu'ils construisent des relations entre le monde des objets et événements et le monde des théories et modèles, il faut donc que la question elle-même et son traitement obligent à faire référence aux niveaux de modélisation relevant de ces deux mondes. Ainsi, des activités comme la recherche d'un nom pour qualifier une grandeur calculée ou de l'expression de l'énergie potentielle conduit les élèves à établir des relations entre les concepts et les phénomènes étudiés. Par exemple dans un des groupes :

*Cédric : Si y avait de l'eau, y'aurait encore de l'énergie potentielle.*

*Et un peu plus tard :*

*Cédric : Ouais mais je pensais que ça serait mais justement, attends ; L'énergie potentielle. Attends, on va la prendre à un niveau. C'est simple, l'énergie potentielle au début, doit être supérieure, toujours. Alors, l'énergie potentielle... la vitesse, c'est combien au capteur 1 ? La vitesse au capteur 1, elle est de...?*

La Figure 52 montre que pour chaque activité proposée, les interactions entre élèves font référence au modèle physique (soit en faisant des relations internes à ce niveau, soit en établissant des relations entre ce niveau et d'autres). Comme nous l'avons signalé plus haut, la prépondérance de ce niveau de modélisation peut être expliquée à travers la notion de contrat didactique : les élèves baignent dans un environnement où ce modèle prime sur tout autre aspect pour fournir une réponse acceptable par l'enseignant. Ce contrat n'empêche pas ces mêmes élèves de faire intervenir le modèle mathématique, pour un traitement allégé des informations. Dans le cas du TP « puissance », pour la grande majorité des élèves, c'est toutefois le modèle physique qui est le plus souvent mobilisé. Pour le TP « énergie cinétique, énergie potentielle », les mises en œuvre du modèle physique sont beaucoup moins nombreuses que celles du modèle mathématique lors de la construction et l'interprétation du graphe. **Le registre sémiotique « graphe » est plus spontanément associé à des connaissances mathématiques qu'à des connaissances physiques, ce qui pose la question de la signification des grandeurs manipulées lorsque la consigne suggère de s'appuyer sur ce registre sémiotique.**

Les analyses plus fines des interactions au cours des différentes activités, présentées dans le manuscrit de thèse, avaient montré que les mesures effectuées sont intégrées dans le modèle physique et deviennent ensuite implicites dans la stratégie de résolution. En effet, une fois inscrite dans le tableau, les valeurs ne sont jamais remises en cause. **Le registre sémiotique « tableau » tend donc à figer les données collectées ce qui facilite leur conversion dans d'autres registres sémiotiques.** Lorsque les élèves émettent un doute sur une valeur, ce n'est pas la mesure qui est remise en cause mais l'activité de prise de mesure, *via* les gestes produits pour mesurer. La confiance que les élèves accordent à la mesure est donc liée à celle accordée aux gestes (mode sémiotique) associés à leur recueil. Ce résultat conforte pleinement ceux obtenus par Millar (1996), selon qui les mesures sont rarement utilisées pour soutenir une conclusion : *« la seule situation qui provoque inmanquablement un retour sur une mesure est celle où quelque chose a manifestement été de travers dans l'opération de mesure. Si bien que les données collectées apparaissent souvent comme le produit final de l'expérimentation, plutôt que comme une **preuve** sur laquelle appuyer une conclusion »* (Ibid., p. 24). L'activité de mesure constitue en elle-même un but de l'expérience, concrétisée par un tableau intégrant les valeurs mesurées au niveau des modèles (physique ou mathématique). Ainsi, **si, pour les élèves, la mesure relève bien initialement du monde des objets et événements, elle est peu à peu intégrée au monde des théories et modèles, conformément au point de vue du physicien.**

### 3.2.2 Le milieu comme consigne implicite pour les activités de modélisation

Outre les consignes écrites, à l'instar d'autres instructions éventuellement verbales ou gestuelles (voir par exemple la partie 4 présentant les résultats conjuguant l'étude et l'enseignement, p. 172), d'autres éléments mis à disposition par l'enseignant, ou convoqués spontanément par les élèves, peuvent influencer les activités de modélisation des élèves. Je présente ici une relecture de deux situations qui ont fait l'objet de publications dans lesquelles les éléments matériels proposés dans la phase de manipulation ont été repérés comme pouvant créer des difficultés dans la mise en relation du monde réel avec le monde des théories et modèles.

- Dans la première situation, portant sur l'électricité en classe de cinquième (Lund & Bécu-Robinault, 2010b[10]), l'enseignant fournit aux élèves du matériel qui va nuire à la construction des objets comme dipôles, possédant deux bornes distinctes.

Dans cette situation, dont la conception a été décrite au chapitre 5 (partie 1, p. 107) les élèves doivent faire briller la lampe avec le matériel à disposition : lampe, pile ronde, fils, et, pinces crocodiles. Ces dernières avaient initialement été fournies pour les aider à connecter les fils sur la lampe et la pile : en pinçant le culot et la borne positive de la pile, les élèves n'auraient qu'à tenir une extrémité d'un fil sur la borne négative de la pile et sur le plot de la lampe. Pour autant, ce matériel ne va pas aider les élèves, ni dans la phase de manipulation, ni dans la construction de la notion de dipôle.

D'une part, les élèves demandent quatre pinces crocodile à l'enseignant qui les leurs fournit. Ils intègrent alors comme règle du contrat didactique (Brousseau, 1990, 1998), que les pinces doivent être utilisées. Or, il n'est pas possible de pincer la borne négative de la pile (non proéminente) ni le culot de la lampe (trop petit). Cette impossibilité conduit les élèves à ne pas identifier la deuxième borne du récepteur et du générateur. Ainsi, **selon ses caractéristiques matérielles, visibles, le matériel mis à disposition peut nuire à une sélection pertinente des caractéristiques du matériel et donc à la conceptualisation liée au modèle physique.**



Figure 53: une affordance non pertinente: le crénelage de la pince crocodile et du culot de la lampe.

D'autre part, les pinces crocodile ont des dents, dont la forme est sensiblement identique au crénelage de la lampe (Figure 53). Cette similitude suggère aux élèves la manière de les accrocher au culot. Selon Suthers et Medina (2011), les instruments offrent des affordances particulières (des possibilités objectives d'action qui doivent être mises en relation avec les acteurs selon Gibson, 1977), dont les saillantes sont supposées être les plus pertinentes (Norman, 1999). Dans ce cas, la forme des pinces était bien saillante, mais leur utilisation non pertinente. En effet, lorsque la pince et la lampe s'emboîtent, le plot de la lampe est masqué, empêchant les élèves d'identifier la deuxième borne de la lampe. Ainsi, les objets fournis aux élèves conduisent, de par leur forme, à induire des possibilités d'actions pas forcément pertinentes. Cette affordance associée à un contrat didactique poussant les élèves à nécessairement utiliser le matériel mis à disposition constitue un frein à la réalisation d'un montage opérationnel. **L'affordance du matériel constitue une contrainte pour la manipulation et en conséquence influence son interprétation au niveau du modèle physique.**

Cet exemple montre que les activités de modélisation sont influencées par les objets disponibles, ainsi que par leurs caractéristiques matérielles. Ces résultats confortent un constat partagé au sein des groupes collaboratifs DBR : nous avons proposé des lampes torche en lieu et place des lampes de poche (objets désormais obsolètes pour les élèves). Ce matériel avait donné lieu à un grand nombre d'interprétations sur la base d'un courant unifilaire, car une partie du circuit électrique est intégrée à la coque de la lampe (voir par exemple Figure 37, p.113 au chapitre 5).

- Dans la deuxième situation, portant sur l'enseignement de l'optique en classe de quatrième (Bécu-Robinault & Lund, 2012[12]), les élèves doivent proposer du matériel pour reproduire une expérience présentée sur une simulation informatique (superposer des lumières colorées).

Ici, c'est le contrat didactique qui va influencer les activités des élèves. Ils tentent d'établir une continuité entre des séances successives en mobilisant un objet préalablement étudié en optique, en l'occurrence un spectroscope, pour produire de la lumière blanche (extrait ci-dessous). Cette suggestion n'avait pas été anticipée, ni par l'enseignant, ni par le groupe collaboratif DBR.

*Noa: c'est quoi là un truc qu'on regarde dedans là*

*Alex: tu fais comme ça regarde*

*Noa: non on regarde la lumière dehors*

*Emma: ah ouais attends*

*Noa: un spectroscope*

*Alex: on voit blanc*

*Noa: spectroscope*

*Enseignant: alors vous avez euh une idée pour euh avoir le même résultat avec avec euh*

*Alex: oui*

*Enseignant: le matériel de euh qu'on a en classe*

*Noa : ouais*

*Alex: monsieur (lève la main)*

*Enseignant: ouais*

*Noa: ben faut mettre faut mettre des filtres des filtres sur le spectroscope*

*Enseignant: sur le spectroscope*

*Noa: mm*

Lors de la séance précédente, consacrée à la décomposition de la lumière blanche, le spectroscope avait été présenté comme un instrument décomposant une lumière colorée. Dans l'extrait, les élèves se remémorent cette précédente situation et la compare avec celle en cours. Ils notent un certain nombre de points communs: « *on regarde la lumière dehors* », « *on voit blanc* ». Le spectroscope, absent physiquement, est pourtant le premier objet suggéré par les élèves. Les élèves suggèrent ici une utilisation visant à provoquer certes, le phénomène inverse de celui étudié à la séance précédente, mais pour lequel la lumière blanche et les lumières colorées sont les phénomènes étudiés. Les observations réalisées sont insuffisantes pour affirmer que les élèves s'appuient sur des caractéristiques physiques de cet instrument (en le retournant par exemple pour provoquer l'observation inverse), d'autant que les élèves n'ont pas cet objet à disposition au moment où il est suggéré. **La volonté des élèves à utiliser un spectroscope peut être interprétée à la fois comme un phénomène lié au contrat didactique** (tout objet étudié lors d'une séance sera certainement utile pour les séances suivantes) **et comme la marque de l'intégration stable (durable) des objets étudiés au niveau des objets et événements en lien avec les connaissances scientifiques du modèle en cours d'étude.** Il est donc essentiel d'aider les élèves à identifier la relation entre les objets étudiés et leur fonction dans le modèle étudié en faisant apparaître le domaine de validité du modèle ainsi que les possibilités d'utilisation des objets. L'analyse de cette situation met en évidence des effets de contrat

au niveau des activités de modélisation : décomposition et recomposition étant des phénomènes proches, relatifs à un même modèle physique (lumières colorées en optique), les élèves leur associent un même instrument.

Contrairement à Johsua et Dupin (1988) qui indiquaient que « *le contrat didactique au collège apparaît comme peu stabilisé* » (Ibid., p. 43), des résultats récurrents dans les travaux que j'ai conduits au collège s'interprètent en termes de contrat didactique. Pour reconstruire les attentes de l'enseignant, de nombreux éléments du milieu sont utilisés par les élèves : la consigne écrite fournie, le matériel mis à disposition, ou bien le contenu des interactions avec l'enseignant comme je le présenterai ultérieurement. Dans les situations exposées ci-dessus, les objets sont porteurs de signes et donc de significations particulières, aidant les élèves à les catégoriser selon des ensembles de phénomènes relatifs à un modèle donné. L'introduction d'un objet induit ainsi la mobilisation de connaissances non nécessairement visées par l'enseignant. Les objets étudiés, les consignes écrites ainsi que les contenus des interactions avec l'enseignant contribuent ainsi de manière synchronique et diachronique à l'établissement d'un contrat didactique lié à la modélisation.

### 3.2.3 Une aide paradoxale à la distinction des niveaux de modélisation : la fusion

Tiberghien (1994) fait l'hypothèse que l'apprentissage de la physique requiert la reconnaissance et l'articulation de deux mondes, le monde des objets et événements et le monde des modèles et théories. Dans la continuité de ses travaux, et afin de préciser les contenus de ces deux mondes, j'ai émis l'hypothèse qu'apprendre la physique passe par la différenciation et la mise en relation des niveaux de modélisation définis au chapitre 4. Telle que je l'ai introduite, la catégorisation des interventions en propositions ne différencie pas les propositions relatives à un niveau seul, à plusieurs niveaux mis en relation, ou à des fusions entre niveaux. A première vue, cette fusion peut paraître problématique du fait car elle ne relève ni d'une distinction des différents niveaux, ni d'une articulation de ces niveaux.

Afin de préciser le rôle de ces fusions dans les activités de modélisation des élèves, je reprends tout d'abord quelques éléments des recherches conduites au sein du projet « énergie ». En effet, j'avais montré au cours de ma thèse que les élèves fusionnent parfois le modèle physique et les objets - événements. Je compléterai ces résultats par des analyses issues des projets « collège » et confirmant le rôle attribué à ces fusions.

En début de séance du TP « puissance », les élèves réalisent le montage et relèvent un certain nombre d'informations qualitatives et quantitatives (l'eau qui chauffe quand on branche le thermoplongeur, mesures de la tension, de l'intensité, de la température et du nombre de tours – énergie – sur le compteur EDF). Pendant cette phase, ils n'ont pas encore accès à l'objectif d'enseignement (construction du concept de puissance comme débit d'énergie) et ont une vision de leurs actions contrainte par leurs connaissances préalables. Aussi, la fonction des objets manipulés est associée aux connaissances liées à l'électrocinétique, comme par exemple, dans le cas du TP au lycée sur l'introduction du concept de puissance :

*Phil : c'est ça et ça ! [montre les appareils de mesure] ça c'est I et ça c'est V*

Le fait de désigner les instruments par la grandeur qu'ils mesurent est analysé comme une fusion entre les niveaux du modèle et des objets et événements. Cette fusion, qui n'est pas requise pour la réalisation de l'expérience, aide toutefois les élèves à sélectionner, parmi l'ensemble des éléments à disposition, des objets considérés comme pertinents et à donner du sens à ces objets manipulés au regard d'un modèle, même si dans ce cas ce n'est pas le modèle qui sera utilisé. Ils commencent ainsi à



donner du sens à l'activité qui leur est proposée, au regard de connaissances en physique. En effet, la chaîne énergétique, même si elle a été introduite lors d'une précédente activité, n'a pas encore acquis un statut équivalent aux autres connaissances préalablement enseignées en physique : c'est un schéma créé pour les besoins du modèle enseigné (une représentation scolaire selon De Vries, 2007), même s'il est en conformité avec le discours scientifique (Tiberghien, Psillos & Koumaras, 1995). Les élèves n'utilisent pas spontanément ce registre sémiotique pour mettre en œuvre le modèle physique. Ils s'appuient en priorité sur les grandeurs physiques qu'ils connaissent déjà (la tension, l'intensité). **Les fusions entre niveaux de modélisation peuvent ainsi être considérées comme une étape intermédiaire dans la construction de la signification de l'activité.**

Un peu plus tard, lors de la construction de la chaîne énergétique, les élèves ne font plus de distinction entre les termes associés à ce registre sémiotique et les associés à la langue naturelle : ils utilisent le terme transformateur pour qualifier le thermoplongeur, ou réservoir pour qualifier la source d'énergie qu'est le secteur EDF. Le traitement de l'information au niveau du registre sémiotique « schéma » nécessite de sélectionner les objets manipulés à représenter, et de leur attribuer un rôle. Lorsque les élèves construisent leur schéma, ils nomment les objets manipulés selon les termes qualifiant leur rôle dans le modèle énergétique. Cette activité, mobilisant le registre du schéma (il s'agit ici d'un schéma explicatif selon Vezin, 1986) favorise donc la fusion entre les niveaux des objets et des modèles. Cette fusion s'explique par la proximité apparente des registres schéma et dessin descriptif, ce dernier mobilisant des termes courants (langue naturelle) en lien avec les connaissances antérieures des élèves. Ainsi, **le registre sémiotique « schéma », tel qu'il est conçu dans cette séquence, favorise des fusions entre niveaux de modélisation.**

Dans le cadre des projets « collège », des équivalents à ces fusions ont également été repérées lors de la mise en œuvre de l'analogie dans les séances sur l'électricité en cinquième (Bécu-Robinault & Buty, 2007). Suite à la présentation de l'analogie des camionnettes et des pains (première version de l'analogie, présentée au chapitre 5, au paragraphe 1.1, p. 107), les élèves devaient interpréter le fonctionnement d'un circuit électrique simple, tout d'abord dans les termes de l'analogie, puis dans les termes de l'électricité. Il s'agissait, comme dans le cadre du projet « énergie », de différencier les analogues pour expliquer, interpréter les phénomènes relatifs soit à la circulation du courant électrique soit aux transferts d'énergie. Toutefois, l'analyse des interactions entre les élèves indique que les termes utilisés qualifient indifféremment l'énergie et le pain : alimenter, consommer, transporter. Dans certains cas, c'est l'enseignante elle-même qui introduit les termes dans l'un des domaines pour ensuite les transposer dans l'autre domaine :

*Enseignante: très bien donc on a les camionnettes qui vont qui vont faire quoi qu'est-ce qu'elles font ces camionnettes? elles transportent elles transportent quoi dans le cas du modèle?*

*Elève: le pain*

*Enseignante: le pain très bien et puis dans le cas du circuit électrique qu'est-ce qu'elles vont transporter?*

*Elève: l'énergie*

*Enseignante: l'énergie très bien donc les camionnettes vont transporter l'énergie électrique / dans le cas si on se place dans le cas de notre circuit électrique. [...] ces porteurs de charge vont circuler effectivement le long des fils de connexion c'est les routes c'est ce que vous avez dit à l'instant tout à l'heure donc ils circulent et permettent d'amener l'énergie électrique où ça dans le cas du circuit électrique*

*Elève : bah à la lampe ou à la LED*

*Enseignante : à la lampe ou à la LED*

Dans cet extrait, l'enseignante s'appuie initialement sur les termes du domaine de référence (les camionnettes *transportent* du pain) puis formule une explication mêlant les deux domaines (les camionnettes *transportent* l'énergie dans le cas du circuit électrique), pour plus tard formuler l'explication uniquement avec des termes du domaine cible (les porteurs de charge amènent l'énergie vers la lampe). Elle passe ainsi progressivement du domaine source au domaine cible, en formulant de manière transitoire une explication fusionnant des termes des deux domaines. Ainsi, **la fusion entre des éléments de deux modèles distincts, peut favoriser l'articulation des analogues et contribuer à une meilleure compréhension du modèle cible.**

Lorsque les élèves doivent intégrer un nouvel élément au modèle (le rôle de l'interrupteur), ils produisent des réponses dans lesquelles les objets du domaine cible sont confondus avec les objets du domaine de référence. Ainsi, en réponse à la question posée par l'enseignante « *quel pourrait être l'équivalent de l'interrupteur sur le circuit des camionnettes ?* », les élèves font les propositions suivantes à l'oral :

*Elève 3: l'interrupteur, c'est un pont... un pont-levis*

*Elève 4: je pense que si t'appuies sur l'interrupteur, les camionnettes elles vont continuer mais après si tu relâches ça fait comme un feu rouge, après tu ré appuies le feu il est vert*

*Elève 5: ça peut être un passage à niveau*

Comme dans le projet « énergie », où les élèves associaient le thermoplongeur à la catégorie « transformateur », les élèves associent ici l'objet « interrupteur » à des objets connus par ailleurs : « pont-levis », « feu tricolore », « passage à niveau ». Ne disposant pas encore d'une terminologie liée au modèle électrocinétique, la catégorisation qu'ils opèrent dépend de leurs connaissances quotidiennes. Ces connaissances, que j'ai associées au niveau des modèles au même titre que les connaissances scientifiques, permettent aux élèves d'enrichir leur modèle explicatif, ici l'analogie.

Dans d'autres cas, les élèves mobilisent des termes qui semblent légitimes, mais qui induisent des explications dans lesquelles le sens attribué aux concepts scientifiques pose problème.

*Célia : Regarde quand il passe l'électricité elle a une seule truc à livrer comme le pain donc comme ça et le donc il y a deux supermarchés à truc à livrer donc elle se décharge là elle a en forcément moins.*

*Caroline : mm*

*Célia : Arrête de rire alors euh la lampe du deuxième attends la lampe du deuxième ne brillera pas comme la lampe du premier parce qu'il n'y a pas*

*Caroline : la première lampe ne brillera pas comme celle du deuxième*

*Célia : lala dans le schéma dans le schéma 2 la lampe de brillera pas autant que dans le schéma 1 la deuxième lampe ne brillera pas enfin ils ne brilleront pas pareil parce que l'électricité elle se décharge là parce que l'électricité a deux fois plus de bouches à nourrir.*

Dans cet exemple, les deux élèves tentent de prévoir comment des lampes branchées en série brilleront comparativement à un circuit avec une seule lampe. Le terme « décharger » utilisé par ces élèves est un terme qui leur paraît légitime pour expliquer une situation en l'électricité. Il prend toutefois ici une signification différente, puisqu'il qualifie l'énergie transportée par les porteurs de charge. Si l'explication construite par les élèves est correcte du point de vue de la prévision formulée, elle reflète une confusion entre l'électricité et l'énergie (l'électricité a deux fois plus de bouches à nourrir). Pour ces élèves, le courant électrique est consommé au fur et à mesure qu'il traverse les différents récepteurs.

Ces confusions, présentes avant enseignement comme je l'ai exposé au chapitre 5 dans la partie 1, largement étudiées par la recherche en didactique (Duit & Von Rhöneck, 1997) s'avéraient donc

insuffisamment travaillées avec l'analogie dans sa version initiale. C'est l'une des raisons à l'origine de sa modification.

Les fusions entre deux niveaux de modélisation, modèle physique et objets-événements ou domaine cible (modèle électrocinétique) et domaine source (analogue de la circulation des camionnettes) sont donc parfois une aide pour articuler ces deux niveaux, un moment de transition nécessaire à l'enrichissement du modèle. Selon les cas, ces fusions constituent également un frein à la compréhension des phénomènes et concepts physiques. Elles sont donc un moment clé dans les situations d'étude lorsque les élèves articulent les différents niveaux de modélisation : **les fusions opérées par les élèves entre deux niveaux de modélisation ou internes à même niveau (entre deux modèles différents), sont une phase transitoire avant une distinction ultérieure de ces niveaux en vue de leur articulation.**

### 3.3 Influence des registres sémiotiques sur les activités de modélisation

Ainsi que je l'ai exposé dans le paragraphe 3.2.4 du chapitre 4, p. 88, j'ai complété les registres sémiotiques de Duval par d'autres modes sémiotiques de manière à inclure les représentations dynamiques mobilisées lors des interactions. Cela m'a fourni des éléments pour analyser le sens porté par les gestes des élèves et de l'enseignant au cours des interactions. Je présente ici deux exemples, brièvement décrits dans un chapitre d'ouvrage et une communication (Lund & Bécu-Robinault, 2010a[8] ; Bécu-Robinault & Lund, 2011), issus uniquement des projets « collège », lorsque les moyens techniques de prise de données et d'analyse ont facilité l'accès à et le traitement de ces modes sémiotiques dynamiques.

#### 3.3.1 Un exemple en électricité

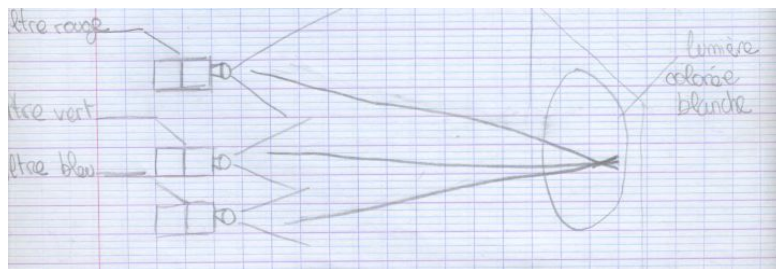
Dans le cadre de l'enseignement de l'électricité, une des activités était dédié à l'étude d'un nouvel objet, l'interrupteur, dont l'analogie devait être discuté. Les élèves, comme nous le discuterons au paragraphe 4.2 de ce même chapitre, p. 175, proposent de nombreux analogues, s'appuyant sur des objets familiers. Ce sont ceux qui présentent le plus d'affinité avec la rupture matérielle, visible, du circuit suivi par les camionnettes (ou l'électricité) qui vont retenir l'attention dans les discussions : le pont-levis ou le passage à niveau, tous deux empêchant le passage des véhicules. C'est d'ailleurs un argument donné par les élèves pour justifier leur réponse : « *ils peuvent plus passer les camions ils sont bloqués* ». De plus, les élèves ont possibilité de mimer ces analogues (mode sémiotique « geste »), communiquant ainsi une représentation de l'interrupteur dans l'analogie. L'enseignante qui a accepté d'être filmée pour la première implémentation de cette séquence, lors du bilan, ne retiendra que le pont-levis pour des raisons de forte similitude entre le mode sémiotique « geste » utilisé pour mimer le pont-levis et le registre sémiotique « schéma » de l'interrupteur dans le modèle électrocinétique (voir paragraphe 4.4, p. 183). Or, les normes pour l'élaboration d'un schéma électrique seront présentées dans une leçon ultérieure : cette proximité entre ces deux représentations n'est donc perceptible que par l'enseignante. A ce moment de la séquence, il ne sera toutefois pas possible de garder une trace écrite du fonctionnement de cet analogue, seul le mode sémiotique dynamique geste étant pertinent pour d'exprimer le fonctionnement dynamique de l'interrupteur. En conséquence, seront conservés, avec une valeur égale dans le cahier, les deux propositions inscrites au tableau : le feu tricolore et la barrière du passage à niveau. Il apparaît donc que **les registres sémiotiques mobilisés dans les phases d'institutionnalisation sont contraints par la possibilité de leur conversion en**

**une trace écrite pérenne pour les élèves. Cette contrainte influence les éléments à intégrer au modèle enseigné.**

### 3.3.2 Un exemple en optique

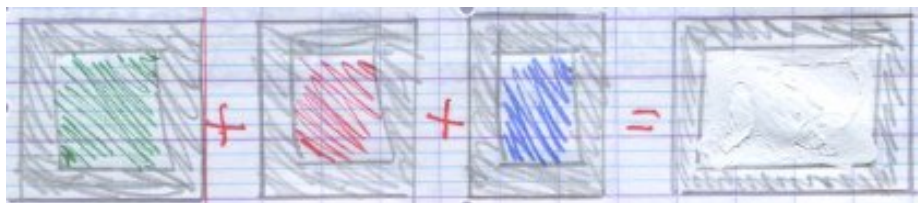
Dans le cadre de l'enseignement de l'optique, il est demandé aux élèves de concevoir une expérience pour produire de la lumière blanche à partir de lumières colorées. Le premier problème qui se pose aux élèves est de produire ces lumières colorées (en fait, il s'agit d'un problème purement scolaire, puisque, dans la classe de physique, ces lumières sont elles-mêmes produites à partir de lumière blanche). Sur ce point, c'est le matériel à disposition (ou supposé disponible) qui va initialement orienter les réponses des élèves (voir par exemple le paragraphe 3.2.2, p. 147, sur l'utilisation du spectroscope).

Après avoir sélectionné le matériel produisant des lumières colorées, il s'agit pour les élèves d'envisager une organisation de ce matériel pour obtenir une lumière blanche. Les données vidéo analysées et les cahiers des élèves révèlent deux grandes catégories de réponses, sous forme de registre sémiotique « dessin » ou « langue naturelle » lorsque les élèves sont interrogés à l'oral<sup>77</sup>.



**Figure 54: un dessin expliquant comment produire une lumière blanche à partir de lumières colorées rouge, verte et bleue**

La première catégorie de réponse correspond au dessin centré sur les phénomènes visibles et observés, à savoir les lumières colorées (Figure 54). Les élèves représentent alors des sources de lumières (le filtre est à l'intérieur de ces sources, ce qui serait à discuter du point de vue de la manipulation associée à ce registre sémiotique) émettant des faisceaux de lumière divergents. Un cercle de lumière colorée blanche semble être le résultat de la convergence de ces trois faisceaux divergents. Ce type de dessin fait abstraction des difficultés d'émission de chacune de lumières colorées. Le mode sémiotique « geste » n'est donc pas mis en relation avec le registre sémiotique dessin.



**Figure 55: un dessin expliquant comment produire une lumière blanche avec des filtres vert, rouge et bleu**

<sup>77</sup> Il ne s'agit pas des deux seules possibilités que les élèves peuvent proposer. Je dispose de huit cahiers d'élèves reflétant ces deux catégories de réponses, les enregistrements des interactions en classe n'en mentionnant pas d'autre. Il est toutefois possible que d'autres propositions aient été dessinées et n'aient pas été discutées publiquement.

La seconde catégorie de réponse fait état de l'origine de ces lumières, qui apparaît comme étant au centre des préoccupations des élèves. Aussi, la réponse fournie sous forme d'un registre sémiotique « dessin » n'est pas orientée sur la lumière blanche, mais sur les objets pour obtenir les lumières colorées et donc est implicitement connectée au mode sémiotique « geste » (Figure 55). Sur cette figure, non seulement ces élèves proposent une addition de filtres, mais cette addition est assimilée à l'équivalent d'un filtre blanc (que les élèves ont peint avec du correcteur blanc). Cette représentation est d'ailleurs discutée au sein du groupe enregistré. Si elle ne fait pas consensus au début, les trois élèves de ce groupe finissent par l'adopter.

*Julie: pourquoi tu fais ça*

*Corentin: c'est un filtre blanc*

*Nicolas: tu filtres*

*Corentin: vas-y mets du blanc moi j'aime bien*

*Nicolas: c'est pas un filtre blanc*

*Corentin: ben si*

*Nicolas: mais non le filtre il est pas blanc*

*Corentin: ben oui mais du blanc du bleu du rouge ça fait du blanc chez moi*

Cette représentation, centrée sur les objets à utiliser pour réaliser l'expérience demandée, ne témoigne pas de la superposition des lumières colorées. Elle est influencée par les objets à disposition (les élèves ne pensent pas pouvoir disposer de plus d'une lampe) et les connaissances préalables des élèves sur le mélange de peintures colorées étudié en arts plastiques (voir dans ce même chapitre paragraphe 4.3.3, p. 181).

Ainsi, les informations sélectionnées et représentées par des registres sémiotiques influencent les relations établies entre le niveau des objets et événements et le niveau modèle (première catégorie de réponse : obtention d'une lumière blanche avec des lumière colorées en lien avec la synthèse additive) ou les relations internes au niveau des objets et événements (deuxième catégorie de réponse : conditions d'émission de lumières colorées avec les objets à disposition).

Ces exemples indiquent que le choix d'un registre sémiotique peut conduire à éliminer des caractéristiques de la situation, même si celles-ci sont par ailleurs discutées comme pertinentes. Représenter une situation nécessite donc de sélectionner les éléments à représenter ainsi que la modalité de représentation, influençant également ce qui peut ou non être représenté. Dans les situations où ce sont des aspects dynamiques qui doivent être traduits par des registres sémiotiques, dans ce cas par les élèves, puis par l'enseignant dans une phase d'institutionnalisation, les gestes sont, lors des interactions, le mode sémiotique le plus pertinent, mais ils sont difficilement convertibles en registre sémiotique sur papier.

### 3.4 Influence des connaissances liées aux mathématiques sur les activités de modélisation et de représentation sémiotique

Les connaissances physiques et quotidiennes ne sont pas les seules que les élèves mobilisent pour interpréter ou expliquer les phénomènes. Dans ma catégorisation des niveaux de modélisation, j'ai introduit le modèle mathématique comme un niveau à part entière, car il contient un ensemble de concepts, de relations, de règles qui peuvent fonctionner de manière autonome sans lien avec le niveau du modèle physique. Cette articulation forte entre mathématiques et sciences expérimentales est

précisée dès l'introduction des programmes officiels de physique-chimie du collège : « *Les mathématiques fournissent des outils puissants pour modéliser des phénomènes et anticiper des résultats, en particulier dans le domaine des sciences expérimentales et de la technologie, en permettant l'expression et le développement de nombreux éléments de connaissance* » (MEN, 2008a, p. 1). Les modèles physiques entretiennent en particulier des relations fortes avec les modèles mathématiques, sur lesquels ils s'appuient pour établir des relations entre grandeurs, lois et principes. Conformément aux injonctions officielles, ces relations sont le plus souvent employées par les enseignants pour aider les élèves à traiter les informations quantitatives (par exemple la construction et l'exploitation d'un graphe, la recherche d'une relation de proportionnalité) : « *la description du monde présentée au collège, en devenant plus quantitative, constitue aussi un champ privilégié d'interdisciplinarité avec les mathématiques* » (Ibid., p. 10). Ces traitements d'informations quantitatives s'appuient sur des registres sémiotiques parfois considérés comme des ponts entre les disciplines, comme les graphes (Baldy & al., 2007).

Dans cette partie, j'expose l'influence des connaissances issues des modèles mathématiques et des registres sémiotiques associés sur l'élaboration des connaissances. Dans un premier temps, j'expose la manière dont les connaissances mathématiques influencent le traitement des données quantitatives lors de l'élaboration du modèle physique. Je reprends à ces fins des recherches issues de mon doctorat et expose une analyse réalisée spécifiquement pour cette note de synthèse. Dans un deuxième temps, je reprends les résultats d'une étude récemment publiée (Aldon & Bécu-Robinault, 2013[13]), où ce sont des connaissances qualitatives relevant des mathématiques qui influencent la construction du modèle physique.

### 3.4.1 Influence des mathématiques sur le traitement des données quantitatives

Dans le projet « énergie », j'ai constaté lors des prises de données, qu'après la partie « manipulation », les élèves passaient un temps conséquent sur le traitement des données quantitatives : construction de graphe ou conversion des mesures dans les tableaux. Il me semblait donc nécessaire d'analyser ce qui se joue, du point de vue des activités de modélisation, pendant cette phase (Bécu-Robinault, 1997a ; Bécu-Robinault, 1997b[1] ; Bécu-Robinault, 2002[3] ; Bécu-Robinault, 2004[4]). Je reprends ici, sur la base de quelques extraits choisis, quelques éléments illustrant les activités de modélisation associées au traitement des données quantitatives. J'expose également les difficultés rencontrées par les élèves à donner une signification physique au résultat du traitement des données quantitatives. Ces extraits concernent deux TP qui ont été étudiés au cours de la thèse au niveau du lycée.

- Le premier est relatif à l'introduction du concept de puissance. Les élèves convertissaient les mesures de l'énergie exprimées en Wattheures (lecture sur un énergie-mètre de type EDF) en Joules. Ils cherchaient ensuite une formule mathématique pour relier la quantité d'énergie transférée à la durée de chauffage. Pour cette situation, ce sont les registres sémiotiques « écriture symbolique » et « tableau » qui servaient à traiter les données quantitatives.
- Le deuxième était un TP dédié à l'étude de la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique lors d'une chute libre et de la conservation de l'énergie mécanique. Après avoir mesuré le temps et calculé la vitesse d'une balle, les élèves construisaient le graphe et trouvaient graphiquement l'expression de la vitesse en fonction du temps. Dans cette situation, c'est le registre des graphes qui aidait au traitement des données quantitatives.

Les activités de traitement des données quantitatives n'ont pas été analysées dans le cadre des projets collège, en raison de l'approche phénoménologique de l'optique et de l'électricité adoptée dans les séances élaborées et analysées, conformément aux programmes officiels.



## Les registres sémiotiques « écriture symbolique » et « tableau » pour le traitement des données quantitatives

La conception du TP « puissance » a fait l'objet de discussions entre enseignants et chercheurs. Les enseignants ont souhaité un format « exercice à trous » pour le recueil des différentes mesures : les élèves complétaient les valeurs de la tension, de l'intensité, de la température initiale, finale, et le temps à chaque tour du compteur d'énergie (vieux compteurs EDF). Les élèves calculaient ensuite la quantité d'énergie à chaque tour de disque, fonction d'une constante indiquée sur l'appareil. Le dernier traitement à opérer consistait à convertir la valeur de l'énergie de Wattheures en Joules.

Les analyses ont montré qu'au cours de cette tâche, 85% des interventions des élèves relèvent des niveaux des modèles physique et mathématique uniquement. La mesure n'est pas mobilisée comme élément de discussion des valeurs obtenues et intégrées aux tableaux. Lorsque les élèves cherchent à calculer le coefficient reliant l'énergie et le temps, les interventions ne mentionnent que très rarement les unités de ces deux grandeurs. A l'instar de Baldy et al. (2007), les difficultés des élèves peuvent être interprétées comme liées « à l'absence de relation entre les symboles et les concepts qu'ils représentent ou le phénomène physique qu'ils modélisent, au non-sens de la formule » (Ibid., p. 81). En effet, les interactions entre les élèves passent sous silence le rapport entre les valeurs numériques et les grandeurs physiques au bénéfice des opérations mathématiques mises en œuvre pour convertir les valeurs et trouver un coefficient de proportionnalité entre l'énergie et le temps<sup>78</sup>. **Lorsqu'ils transforment des informations quantitatives sur des grandeurs physiques, les élèves marquent une préférence pour le modèle mathématique au détriment du modèle physique.**

*Charles : 74, divisé par 3,6 t'obtiens exactement 3,53... ça se rapproche de plus en plus de 3,6... et divise 25,7 par 7,2 et caetera ... tu trouves environ une moyenne de 3,6*

Les indications dans les tableaux de mesures complétées et *in fine* traitées par les élèves sur leur compte rendu sont davantage des indications numériques que des valeurs associées à des grandeurs. En effet, les élèves complètent initialement le tableau avec des valeurs mesurées (l'énergie en watts-heure, le temps en minutes et secondes, la température en degrés Celsius), puis ils transforment l'énergie en Joules, le temps en secondes. Ils reportent la valeur obtenue dans le tableau. Les unités figurant déjà dans la première ligne, les élèves pouvaient reporter seulement la valeur numérique sans mentionner les unités. Or, ces unités sont ce qui donne le sens physique à la valeur numérique et elles garantissent le traitement des informations quantitatives au niveau du modèle physique.

Les comptes rendus de TP des élèves de toutes les classes suivies au cours du projet n'avaient pas été analysés au cours de la thèse. C'est l'intérêt de prendre en charge les différents registres de représentation dans mon cadre épistémologique qui m'incite aujourd'hui à reprendre ces données et analyser ces productions. Ainsi, sur l'ensemble des 149 comptes rendus de TP dont je dispose en relation avec l'activité relative à l'introduction du concept de puissance, 78 tableaux sont complétés comme indiqué sur la Figure 56, c'est à dire sans aucune mention des unités de l'énergie du temps et de la température. Les élèves manipulent ensuite les nombres organisés dans le tableau sans faire référence aux unités de mesure garantissant le lien avec les grandeurs physiques sous-jacentes. **Le registre des écritures symboliques est donc étroitement lié au niveau du modèle mathématique.**

<sup>78</sup> On pourra constater en paragraphe 4.3.3 de ce chapitre que le fait de mentionner très précisément quels sont les éléments mobilisés peut considérablement alourdir les échanges sans forcément aider à la clarification des éléments du modèle enseigné.



| n (tours) | E (Wh) | E (J)  | t (min et s) | t (s) | $\theta$ (°C)      |
|-----------|--------|--------|--------------|-------|--------------------|
| 0         | 0      | 0      | 0            | 0     | $\theta_0 = 20$    |
| 1         | 2,5    | 9000   | 0 min 13'    | 12,9  |                    |
| 2         | 5      | 18000  | 0 min 26'    | 26,5  |                    |
| 3         | 7,5    | 27 000 | 0 min 40'    | 39,6  |                    |
| 4         | 10     | 36 000 | 0 min 54'    | 54    |                    |
| 5         | 12,5   | 45 000 | 1 min 08'    | 68    |                    |
| 6         | 15     | 54 000 | 1 min 22'    | 82    |                    |
| 7         | 17,5   | 63 000 | 1 min 36'    | 96    |                    |
| 8         | 20     | 72 000 | 1 min 50'    | 110   |                    |
| 9         | 22,5   | 81 000 | 2 min 3'     | 123,5 |                    |
| 10        | 25     | 90 000 | 2 min 18'    | 138   | $\theta_{10} = 34$ |

Figure 56: tableau de mesure complété par des élèves dans lequel les nombres peuvent être lus indépendamment des unités et donc des grandeurs physiques associées.

Parmi les autres comptes rendus, 38 ne mentionnent que l'unité des températures (notée par ailleurs de manière partielle ° et non °C). La relation étant à trouver entre l'énergie et le temps, les traitements des données figurant sous un registre d'écriture symbolique sont donc considérés comme identiques aux précédents pour lesquels aucune unité n'est mentionnée. Il est probable que ce nombre plus important de référence à l'unité de température soit lié au fait que c'est la seule valeur qui n'est pas transformée lors de son inscription dans le tableau. Dans le cas des valeurs de la tension et de l'intensité que les élèves devaient également reporter, le format « texte à trous » ne laissait pas le choix aux élèves : seule la valeur numérique était à reporter (voir l'exemple donné en Figure 59). Ici encore, le registre des écritures symboliques est étroitement associé au niveau du modèle mathématique.

| n (tours) | E (Wh) | E (kJ) | t (min et s) | t (s) | $\theta$ (°C)   |
|-----------|--------|--------|--------------|-------|-----------------|
| 0         | 0      | 0      | 0            | 0     | $\theta_0 = 18$ |
| 1         | 3,6    | 12,9   | 12 sec       | 12    | 35°             |
| 2         | 7,2    | 25,9   | 25 sec       | 25    | 42°             |
| 3         | 10,8   | 38,8   | 38 sec       | 38    | 45°             |
| 4         | 14,4   | 51,8   | 51 sec       | 51    | 50°             |
| 5         | 18     | 64,8   | 1 min 4 sec  | 64    | 55°             |
| 6         | 21,6   | 77,7   | 1 min 18 sec | 78    | 60°             |
| 7         | 25,2   | 90,7   | 1 min 30 sec | 90    | 65°             |
| 8         | 28,8   | 103,6  | 1 min 43 sec | 113   | 68°             |
| 9         | 32,4   | 116,6  | 2 min        | 120   | 73°             |
| 10        | 36     | 136,8  | 2 min 8 sec  | 128   | 80°             |

Figure 57: tableau de mesure complété par des élèves : l'unité de température est indiquée, mais les valeurs de l'énergie et du temps peuvent être lues indépendamment de leurs unités respectives.

Au total, seuls 15 comptes rendus mentionnent, pour chaque valeur inscrite dans le tableau, l'unité du temps, et aucun ne fait référence à l'unité de l'énergie. En fait, cette valeur de l'énergie a un statut particulier, puisqu'elle est le produit de deux calculs successifs : transformation du nombre de tours en quantité d'énergie (Wh) puis en Joules. Il semble donc que **plus les élèves effectuent d'opérations pour obtenir la valeur d'une grandeur dans l'unité adéquate, plus le registre des écritures symboliques est associé au niveau du modèle mathématique.**

Les calculs opérés sur l'énergie et le temps sont ensuite effectués sur la base des valeurs numériques. A l'occasion de la rédaction de cette note de synthèse, j'ai souhaité étudier les réponses des élèves sur la relation entre l'énergie et le temps : indication des unités, ce qui était explicitement requis par la consigne, et la forme prise par la réponse (mobilisation de symboles numériques ou littéraux). Ce retour sur les données collectées lors de ma thèse s'appuie sur le postulat suivant : si les élèves ne manipulent que des symboles numériques sans expliciter le lien avec les unités, et qu'ils donnent une réponse en restant dans ce registre sémiotique, alors le lien avec les grandeurs du modèle physique risque d'être rompu et la construction du sens physique des mesures sera compromise. Pour vérifier

cette hypothèse, j'ai repris les comptes rendus et analysé les réponses écrites des élèves relatives à la relation entre l'énergie et le temps.

**Figure 58: formules mathématiques produites par deux groupes d'élèves pour relier la quantité d'énergie transférée et le temps.**

Par exemple, dans la Figure 58, deux réponses sont formulées dans le registre des écritures symboliques. Il convient de distinguer deux types d'écritures selon les symboles utilisés : numériques ou littérales. A gauche, les élèves donnent une relation littérale et une relation mixte (symboles numériques et littéraux) en spécifiant les unités, alors que la réponse de droite est une réponse purement littérale qui mentionne aussi les unités. Le Tableau 8 indique la répartition des réponses en fonction des registres sémiotiques utilisés et de l'indication des unités des grandeurs mises en relation.

**Tableau 8: la répartition des réponses concernant les unités et les symboles utilisés dans la relation entre l'énergie et le temps. Les pourcentages sont donnés à titre indicatif.**

| Nombre de comptes rendus                           | Le coefficient est donné avec des symboles numériques | Le coefficient est donné avec des symboles littéraux | Le coefficient est donné avec des symboles numériques et littéraux | Total       |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Avec indication des unités dans la relation</b> | 35<br>(65%)                                           | 15<br>(55%)                                          | 37<br>(56%)                                                        | 88<br>(60%) |
| <b>Sans indication des unités dans la relation</b> | 19<br>(35%)                                           | 12<br>(45%)                                          | 29<br>(44%)                                                        | 60<br>(40%) |
| <b>Sans réponse</b>                                |                                                       |                                                      |                                                                    | 1           |
| <b>Total (N = 100%)</b>                            | 54                                                    | 27                                                   | 66                                                                 | 149         |

Contrairement à l'hypothèse émise, les élèves fournissant une réponse uniquement avec la valeur numérique de la puissance explicitent davantage les unités et donc le lien avec les mesures effectuées et les grandeurs en jeu. Un peu plus de la moitié des élèves qui donnent un coefficient sous forme littérale, ou sous forme littérale et numérique explicitent ces relations. Les traitements de données organisées dans un tableau impliquent des calculs, soit pour convertir les données, soit pour obtenir un coefficient. Elles sont opérées sans relation avec les grandeurs physiques représentées. Ces traitements relèvent donc généralement du seul modèle mathématique. Pour autant, **dans cette situation et à ce niveau d'enseignement, l'absence de référence explicite au modèle physique lors du traitement des données numériques n'est pas un obstacle à l'élaboration d'une nouvelle relation à intégrer au modèle physique.**

Même si les feuilles à compléter avait fait l'objet d'un consensus, un enseignant, pour aider les élèves, a proposé de ne pas relever la température à chaque tour de disque, et de remplacer la colonne température par le résultat du rapport  $E/t$  (Figure 59). J'ai donc étudié les effets de cette modification sur les réponses des élèves.

Noter  $\bar{U} = 225 \text{ V}$ ,  $V$  et  $I = 2,8 \text{ A}$   $\theta_i = 18^\circ \text{C}$   $\frac{E}{t}$

| n (tours) | E (Wh) | E (J)   | t (min et s) | t (s) | $\frac{E}{t}$ |
|-----------|--------|---------|--------------|-------|---------------|
| 0         | 0      | 0       | 0            | 0     | 0             |
| 1         | 3,6    | 12 960  | 2,7          | 2,7   | 480           |
| 2         | 7,2    | 25 920  | 5,4          | 5,4   | 480           |
| 3         | 10,8   | 38 880  | 1,23         | 83    | 467           |
| 4         | 14,4   | 51 840  | 1,49         | 109   | 475           |
| 5         | 18     | 64 800  | 2,16         | 136   | 496           |
| 6         | 21,6   | 77 760  | 2,44         | 164   | 494           |
| 7         | 25,2   | 90 720  | 3,12         | 192   | 492           |
| 8         | 28,8   | 103 680 | 3,38         | 218   | 475           |
| 9         | 32,4   | 116 640 | 4,06         | 246   | 474           |
| 10        | 36     | 129 600 | 4,33         | 273   | 493           |

Noter la température finale (température maximale obtenue) :  $\theta_f = 65^\circ \text{C}$

moyenne : 494,6

Figure 59: une variante du tableau de mesures faisant apparaître le calcul du rapport entre les valeurs de l'énergie et du temps.

Cette modification de la consigne permet de figurer sur un même registre sémiotique « tableau », des grandeurs mesurées et les résultats de calculs mettant en relation deux grandeurs. On pourrait faire l'hypothèse que cela facilite le passage du traitement au niveau du modèle mathématique vers l'interprétation au niveau du modèle physique. L'analyse des réponses indique que cette modification ne semble pas aider à l'utilisation des unités, et donc à l'articulation entre les niveaux de modélisation des modèles mathématique et physique, puisque seule la moitié des élèves de cette classe ont répondu en mentionnant les unités des grandeurs mises en relation.

De même, certains enseignants ont suggéré aux élèves de représenter graphiquement la droite  $E = f(t)$ . Dans d'autres classes, des élèves ont spontanément eu recours à ce registre de représentation. Sur 19 groupes d'élèves ayant construit le graphe  $E=f(t)$ , seuls 6 ont fourni une réponse mentionnant les unités dans la relation. La plupart des traitements mobilisent alors des termes en référence aux mathématiques : équation de la droite, pente, les abscisses (t) et ordonnées (E) sont renommées x et y conformément aux usages en mathématiques (Figure 60).

La représentation graphique montre que la formule  $E = f(t)$  est une droite d'équation  $y = ax$ , donc que la formule recherchée est  $E = Pxt$  (la pente représente la puissance).

Figure 60: une réponse d'un élève suite à l'exploitation du graphique  $E = f(t)$

Ainsi, si les calculs opérés sur les valeurs des mesures au sein du seul modèle mathématique ne semblent pas constituer un obstacle à la mise en relation des mesures avec le modèle physique et donc la construction du sens des grandeurs manipulées, il semblerait par contre que **l'introduction du registre des graphes soit un frein à l'interprétation des données quantitatives au niveau du modèle physique**. Ce résultat incite à étudier plus en détail ce qui se joue dans la construction et l'exploitation des informations quantitatives lorsqu'elles sont traitées au niveau du registre sémiotique des graphes.

### Le registre sémiotique « graphe » pour le traitement des données quantitatives

Dans cette partie, je ferai référence à une autre situation concernant la relation entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle dans un système mécaniquement isolé. Ces expériences ont été réalisées après l'étude de la conservation de l'énergie. Sous une dénomination commune « énergie

cinétique - énergie potentielle » avec un objectif commun (conservation de l'énergie mécanique), deux situations expérimentales et textes de TP différents ont été étudiés. La première situation est l'étude de la chute libre qui a été analysée comme étant pérenne dans les manuels depuis de début du siècle (Bécu-Robinault & Tiberghien, 1998[2]). La deuxième situation met en jeu une chute sur un plan incliné. Dans les deux situations, les frottements sont négligés.

Les analyses des transcriptions des discours des élèves lors de la construction et de l'exploitation du graphe  $v = f(t)$ , montrent que les interventions des élèves relèvent le plus souvent du niveau du modèle mathématique seul, même si quelques mises en relation avec le niveau de la mesure sont effectuées.

*Béatrice : Bon, on lui donne quoi comme nom à ce point?*

*Sarah : On l'appelle E on s'en fout ! /*

*Béatrice : Alors soit E... 0,5*

*Sarah : Son coefficient directeur c'est delta sur delta... Attends ! il a dit quoi déjà? Delta t sur delta v?*

*Béatrice : Delta t sur delta v...*

*Sarah :  $Y = ax + b$ . /  $ax$  égal à ... y moins b. x est égal à b plus... / je ne sais même plus !*

Dans cet exemple, les élèves s'appuient sur la définition mathématique pour calculer le coefficient directeur, sans parvenir à articuler les dénominations « mathématiques » des ordonnées et abscisses y, x, aux grandeurs physiques temps (t) et vitesse (v). Des difficultés similaires sont trouvées lorsque les élèves, obtenant une valeur numérique, peinent à lui donner un sens du point de vue qualitatif dans les termes du modèle physique. En effet, même si mathématiques et physiques s'intéressent au calcul des incertitudes, les marges d'erreur en physique sont aussi à mettre en relation avec le mode d'obtention des données mesurées, ce qui apparaît rarement dans les interventions des élèves. **La difficulté des élèves à mettre en relation les mesures et les valeurs indiquées sur le graphe constitue un frein à l'interprétation au niveau du modèle physique.**

*Diane : et nous on trouve quoi*

*Sophie : ben 9,5 et 1 exactement*

*Diane : tu te fous de moi 1 1*

*Sophie : et ben tu as 0,87*

*Diane : 9 mais non, nous 0,87 c'est b c'est pas le coefficient directeur*

*Sophie : mais lui il a 0,65 en b hein*

*Diane : oui mais nous en a on a 1,1 lui il a 9,5*

*Sophie : et ben calcule la différence tu verras*

Cet exemple illustre les traitements au niveau du graphe (tracé, interprétation qualitative), et les calculs sur des valeurs obtenues à partir de l'exploitation de ce graphe (coefficient directeur ici) comme relevant essentiellement du modèle mathématique. Ces traitements ne sont que peu mis en relation avec le modèle physique. Les élèves comparent les nombres obtenus avec ceux obtenus par d'autres groupes d'élèves, validant ainsi leur réponse davantage par d'autres formulées avec un même registre que par des relations avec d'autres registres.

Lorsque des relations avec la mesure sont effectuées, c'est pour préciser quelle est la mesure à convertir et comment la faire figurer dans le tableau de valeurs. Seules sont ensuite utilisées les valeurs numériques du tableau. Ces valeurs sont traitées indépendamment des relations qu'elles entretiennent, que ce soit avec le niveau de la mesure (en lien avec l'activité conduite pour mesurer ces valeurs) ou celui du modèle physique (en lien avec les grandeurs physiques que ces valeurs représentent). Le niveau du modèle mathématique est donc composé d'éléments construits par les élèves et il est utilisé comme intermédiaire facilitant le traitement des données dans le registre sémiotique des graphes. **Les niveaux du modèle mathématique, de la mesure et surtout des objets/événements sont**

**peu mis en relation lors de l'élaboration et l'exploitation d'informations figurant dans le registre sémiotique des graphes.**

Dans les transcriptions, les élèves ne mettent plus en relation les nombres et la mesure qu'ils représentent dès que les informations quantitatives figurant sur les appareils de mesure ont été lues et inscrites sur un document sous forme de registre sémiotique « tableau », « graphe » ou « écriture symbolique ». Dans le premier exemple ci-dessous, la mesure de la grandeur température devient un nombre (20). Dans le deuxième exemple, l'élève ajoute des nombres les uns aux autres sans que l'on sache ce qui justifie cette addition (ni même, lorsque l'exemple est sorti de son contexte comme ici, ce que ces nombres représentent). Il s'avère que lorsque de tels échanges se poursuivent, les élèves ne savent plus *in fine* à quoi ces nombres réfèrent, ni en termes de mesure, ni en termes de grandeurs physique.

- *Noémie : J'ai regardé la température, c'est 20.*
- *Marc : 18, ouais plus 3,6. ça fait 15 ouais 3 ouais si si ça fait 18!*

Les analyses produites sur les exploitations des graphes révèlent les mêmes difficultés : les élèves font appel à des connaissances relevant du modèle mathématique (forme de l'équation d'une droite ou formule du calcul de la pente d'une droite par exemple), mais ne parviennent pas à associer les symboles littéraux usités en mathématiques ( $x_A$ ,  $y_A$ ,  $x_B$ ,  $y_B$ ) avec les grandeurs physiques mesurées et transformées, figurant sur le registre « graphe ». Dans l'exemple ci-dessous, les élèves ne parviennent pas à convertir une formule apprise en classe de mathématiques (avec les symboles littéraux habituellement utilisés dans cette discipline) en une formule applicable pour le modèle physique en cours d'étude. La prégnance des connaissances mathématiques va les amener à construire et exploiter le graphe sur la base du modèle mathématique :

*Béatrice : Bon, on lui donne quoi comme nom à ce point?*

*Sarah : On l'appelle E on s'en fout ! /*

*Béatrice : Alors soit E... 0,5*

*Sarah : Son coefficient directeur c'est delta sur delta... Attends ! il a dit quoi déjà? Delta t sur delta v?*

*Béatrice : Delta t sur delta v...*

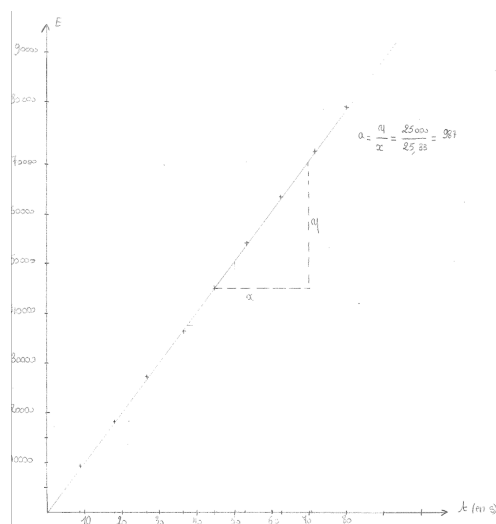
*Sarah :  $Y = ax + b$ . /  $ax$  égal à ...  $y$  moins  $b$ .  $x$  est égal à  $b$  plus... / je ne sais même plus !*

*Plus tard*

*Béatrice : alors attends où elle est l'équation de la droite ? l'équation de la droite est de la forme  $v //$*

*Sarah :  $at + b$*

Ce recours systématique aux éléments du modèle mathématiques est visible sur les traitements directement opérés sur le registre graphe (Figure 61)



**Figure 61: un exemple de traitement du graphique  $E=f(t)$  à l'aide du modèle mathématique**

Ainsi, les différences de symboles utilisés dans les registres des écritures symboliques en mathématique et en physique constituent un obstacle à l'interprétation du registre « graphe » au niveau du modèle physique.

### 3.4.2 Influence des mathématiques sur le traitement des données qualitatives

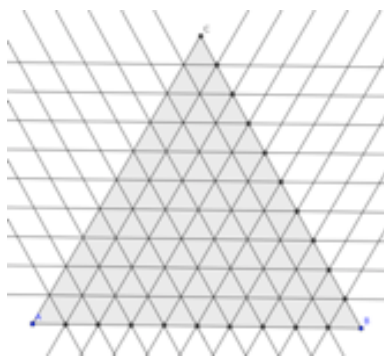
#### Présentation de la situation analysée

Afin de donner des éléments de discussion sur l'influence des connaissances mathématiques sur le traitement des données qualitatives, je m'appuie sur une étude réalisée lors d'un projet qui s'apparente davantage à la recherche-action que la Design-Based Research : il s'agissait pour des enseignants d'une même zone géographique d'éducation prioritaire de renforcer, de la maternelle au collège, la cohérence des pratiques des démarches scientifiques dites d'investigation. Gilles Aldon et moi-même avons proposé de mutualiser et comparer les pratiques des enseignants sur une thématique commune, l'eau, en précisant les apports des situations d'enseignements selon les niveaux scolaire tant du point de vue des méthodes (démarche d'investigation) que des contenus scientifiques (transport, mesures de volume, qualité de l'eau, changements d'état, modèle moléculaire). L'attente des enseignants était de mieux articuler leurs pratiques en prenant appui sur les activités réalisées par leurs collègues, afin d'inscrire l'enseignement dans une relative continuité. Pour les chercheurs, c'était l'occasion d'appréhender quelques spécificités des zones d'éducation prioritaires (difficultés des élèves, conditions d'enseignement) et d'étudier les représentations sémiotiques mobilisées par les enseignants du début de l'enseignement primaire à la fin du collège. L'immersion sur le terrain a été indispensable : rencontres avec les enseignants, présentation des activités habituellement conçues, collecte des productions des élèves, organisation de séminaires et de rencontres entre les participants. En fin de projet, un retour a été fait aux enseignants pour modifier les séances en fonction des résultats obtenus. Les séances conçues et analysées n'étaient donc pas fondées sur des résultats de recherche. L'apport des chercheurs a davantage porté sur des solutions ponctuelles à des problèmes rencontrés lors de pratiques ordinaires (Calmettes, 2010). Les résultats de cette recherche mettent en évidence que l'intérêt du cadre épistémio-sémiotique n'est pas limité aux projets apparentés à la Design-Based Research. La recherche publiée à l'issue de ce projet (Aldon & Bécu-Robinault, 2013[13]) est une situation sur l'utilisation d'un



modèle moléculaire pour expliquer les changements d'état de l'eau au collège dans une classe de quatrième SEGPA<sup>79</sup>.

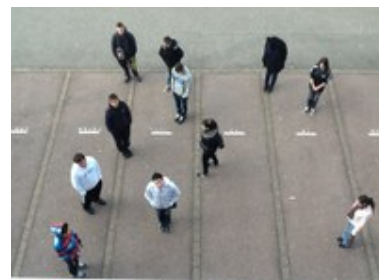
Comme tous les enseignants du projet, l'enseignante de cette classe de SEGPA souhaite faire pratiquer une démarche d'investigation à ses élèves. Ses objectifs sont de faciliter la conceptualisation des objets en proposant plusieurs représentations possibles des particules. Elle articule ses séances consécutives de mathématiques et de sciences de manière à faire un lien entre ces deux disciplines. En mathématiques, les élèves travaillent sur la technique de construction du triangle équilatéral à partir d'un segment de 10 cm à reprendre au compas pour déterminer le 3<sup>e</sup> sommet. Les élèves repèrent ensuite tous les centimètres sur les côtés du triangle avec la règle, et tracent des parallèles au premier côté du triangle à l'aide des repères, puis au second, puis au troisième (Figure 62). L'activité mathématique s'achève par un découpage des cent petits triangles équilatéraux de 1 cm de côté ainsi obtenus.



**Figure 62: le dessin des triangles équilatéraux de 1 cm de côté, sur la base d'un segment de 10 cm**

A la suite de cette activité mathématique, l'enseignante propose une séance de physique afin de construire une explication à un phénomène préalablement observé, à savoir qu'à quantité égale, l'eau solide occupe un volume plus important que l'eau liquide. C'est sur cette séance de physique que l'analyse a portée. Cette séance se décompose en trois situations (Brousseau, 2004) :

- un mime par les élèves de l'organisation des particules dans les trois états de l'eau (Figure 63<sup>80</sup>) ; Le mime relève du mode sémiotique dynamique « geste » et « posture corporelle ».

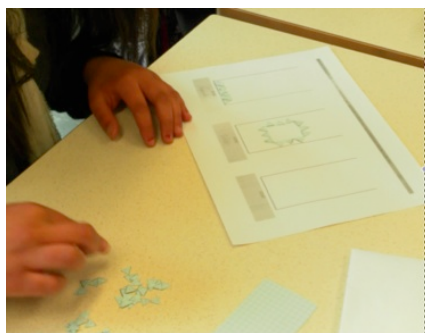


<sup>79</sup> Les séances conçues au sein de ce projet sont consultables sur le site <http://ife.ens-lyon.fr/sciences21>

<sup>80</sup> Les photos du mime reproduites sur cette figure ont été prises lors de la deuxième année du projet. La première année, le même mime était réalisé dans la salle de classe, et la perspective des photos prises dans ces conditions ne permet pas de visualiser la configuration spatiale des élèves dans les trois états. En fin de séance, les photos sont présentées aux élèves pour de la discussion collective afin de comparer les dispositions dans les différentes situations. Il était donc important de choisir une perspective dans laquelle les élèves pourraient voir leurs positions relatives.

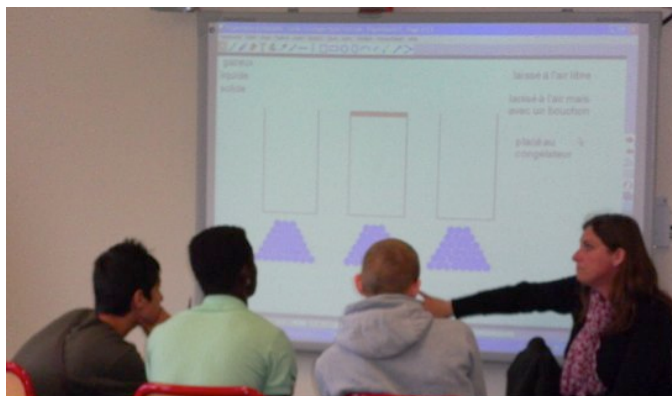
**Figure 63: le mime des trois états de l'eau (à gauche, état solide, au centre, état liquide, à droite état gazeux)**

- une utilisation des productions « mathématiques » des élèves, à savoir les petits triangles équilatéraux découpés dans le papier cartonné (Figure 64) ; ces triangles sont des unités signifiantes discrètes qui doivent être assemblées pour composer un registre sémiotique du type dessin figurant une disposition spatiale des molécules. Cette production n'est pas un schéma, car la disposition spatiale est librement choisie par les élèves sans contrainte de règles ou de conventions préalablement établies.



**Figure 64: une utilisation des triangles cartonnés pour représenter les trois états de l'eau**

- une utilisation du TBI, sur lequel les particules sont représentées par des disques (Figure 65). Ces disques, tout comme les triangles, composent un registre sémiotique dessin, car ils doivent être déplacés vers les schémas des béchers<sup>81</sup> pour indiquer la disposition des molécules dans chacun des états.



**Figure 65: la situation au tableau blanc interactif, avec des disques.**

L'objectif assigné par l'enseignante à cette séance est de mettre en évidence que la représentation des molécules d'eau par des unités signifiantes « triangles » permet, mieux qu'avec des disques, de fournir une explication de cette augmentation de volume.

<sup>81</sup> Les béchers sont schématisés selon les normes habituelles en chimie. On a donc une superposition d'un registre sémiotique « dessin » sur un registre sémiotique « schéma ».

## Les modèles en jeu

Le modèle à enseigner ayant été élaboré par l'enseignante en dehors de toute orientation des chercheurs du projet, il est nécessaire d'en faire une première analyse, au regard de son caractère théorique et fonctionnel (Walliser, 1977). Ces caractères font émerger le domaine de validité du modèle à construire, regroupant l'ensemble des phénomènes à interpréter. Deux aspects liés au caractère théorique sont discutables car non conformes aux savoirs scientifiques : ce que l'enseignante désigne par « particule » et l'explication de l'augmentation de volume sur la base des formes des particules.

- Les particules sont représentées soit par des disques, soit par des triangles. Ces unités signifiantes, constituant un registre sémiotique « dessin », sont données par l'enseignante, sans que leurs propriétés en lien avec le modèle physique (ces unités représentent des particules) ne soient explicitées : une fois la forme choisie, les unités sont de dimension invariable. Dans les modèles particuliers usuels, les particules sont des atomes ou des molécules, et elles sont souvent représentées par de petites entités assimilables à des points pour éviter que les élèves ne leur attribuent des propriétés macroscopiques. Ici, la forme triangle a été choisie par l'enseignante comme *une approximation de la forme des molécules d'eau* : il s'agit donc davantage d'un modèle « moléculaire » (Brehelin & Guedj, 2007).
- Ce modèle laisse à penser que c'est la forme des particules qui explique que la dilatation de l'eau lorsqu'elle passe de l'état liquide à solide. Or, le modèle du physicien explique ce phénomène par le réarrangement moléculaire, et non par la forme des molécules.

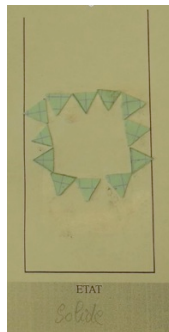
Malgré ces critiques, la légitimité des choix opérés par l'enseignante repose sur un modèle explicatif en adéquation avec les capacités cognitives présumées des élèves, sur la base d'une réflexion s'appuyant sur l'articulation des registres de représentation, et d'une volonté de laisser les élèves agir sur les objets et de confronter leurs explications pour sélectionner la plus pertinente. Ainsi, la sélection des formes des représentations des molécules d'eau « triangle » ou « disque » repose sur le fait que les unités signifiantes telles que les disques ne permettent pas de trouver une règle d'agencement des particules, contrairement aux unités signifiantes « triangles ». C'est ce caractère fonctionnel du modèle qui a été pris en charge par l'enseignante, le caractère théorique étant sous-estimé (Méheut, 1996).

## Les connaissances mises en œuvre par les élèves lors de la manipulation des registres sémiotiques

Au cours de cette séance, les élèves s'appuient spontanément sur des connaissances issues de la vie quotidienne : l'état solide, c'est l'eau à l'état « glaçon », elle a donc une forme de cube, représentée dans le plan par un carré. Les élèves se mettent donc en carré lors du mime (voir Figure 63), et positionnent les triangles en carré pour l'état solide (Figure 66). Ici, la conversion des registres « geste » en « dessin » ne pose pas de difficultés aux élèves<sup>82</sup>.

---

<sup>82</sup> Pour rappel, j'avais indiqué en paragraphe 3.1.3 de ce même chapitre que la conversion du dessin vers le geste était une conversion qui posait des problèmes aux élèves.



**Figure 66: un positionnement des triangles-particules en forme de carré**

Toutefois, la mobilisation d'un modèle naïf de l'organisation des entités microscopiques, quel que soit le registre sémiotique choisi, indique une confusion entre les aspects microscopiques et macroscopiques des états de l'eau. On retrouve ici un résultat classique sur la confusion des propriétés microscopiques et macroscopiques de la matière (par exemple, Barlet & Plouin, 1997 ; Kozma & Russel, 1997). Cette confusion est présente tout au long de cette séance. Les élèves ayant déjà observé la surface plane de l'eau liquide, ils font figurer cette surface à l'échelle microscopique avec les unités signifiantes « disque » et « triangle ». Pour cela, ils organisent les triangles selon une configuration identique à celle avant leur découpage en mathématiques, et avec les disques, ils déforment un disque en l'étirant pour en faire une ellipse la plus plate possible. Les connaissances explicitées lors du mime sont réinvesties avec le TBI quand les élèves étirent les disques pour simuler une impression de mouvement des particules (Figure 67). Une fois encore, même si la réponse au TBI est erronée, les élèves ne manifestent pas de difficulté à convertir le registre « geste » en « dessin ».



**Figure 67: la représentation finale des élèves au TBI (à gauche : eau à l'état gazeux, au centre à l'état liquide, et à droite à l'état solide)**

Parfois, les registres sémiotiques manipulés aident à faire des liens entre les situations. Pour les triangles, les élèves représentent l'état solide par un carré, les triangles se touchant par un angle, tout comme dans le mime, les élèves se touchaient par les mains. Ce n'est pas le cas pour les disques, l'agencement en carré pour l'état solide n'étant pas suggéré. En revanche, la disposition proposée par les élèves avec les unités signifiantes « disques » tend à mettre en évidence la compacité de l'eau solide (sur la Figure 67, représentation à droite), les élèves superposant les disques pour supprimer les espaces

blancs visibles. Les propriétés de ce registre sémiotique autorisent cette suppression des espaces, car le logiciel de dessin sur le TBI n'interdit pas la superposition des formes<sup>83</sup>.

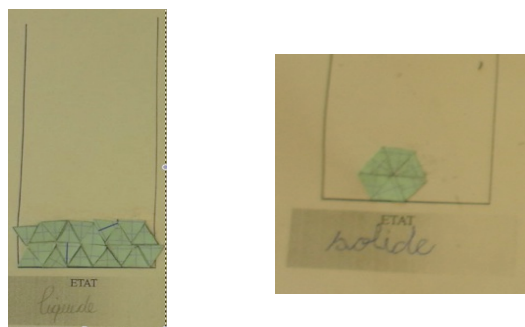


Figure 68: deux dispositions utilisant les propriétés géométriques des formes manipulées

Les analyses des interactions et des productions des élèves fait des connaissances relevant des modèles mathématiques et physiques. Si certaines de ces connaissances paraissent communes aux deux disciplines, elles embarquent en fait des propriétés et des significations spécifiques à la discipline de référence. Ainsi, **lorsque les propriétés physiques associées aux registres mobilisés ne sont pas accessibles aux élèves** (lorsqu'elles ne sont pas explicitées par l'enseignant, ou lorsqu'elles ne sont pas suffisamment prégnantes dans la situation proposée), **les élèves utilisent les propriétés mathématiques habituellement associées à ces registres sémiotiques, en relation avec leurs connaissances quotidiennes des états à représenter** (Figure 68) : la disposition des triangles équilatéraux s'appuie sur leurs propriétés géométriques et n'explique pas les phénomènes physiques. Ainsi, les mathématiques servent à suppléer au manque de signification des registres sémiotiques manipulés : les élèves ne manipulent plus des unités signifiantes représentant des molécules (modèle physique), mais des ellipses ou des triangles (modèle mathématique). La construction des triangles en classe de mathématiques justifie le recours aux connaissances mathématiques lors de leur organisation spatiale. On retrouve ici des effets de contrat didactique mettant en cohérence la succession des séances, comme exposé dans le paragraphe 3.2.2 de ce même chapitre, p. 147). De plus, l'enseignante est en charge de ces deux enseignements successifs (mathématiques, puis physique), ce qui renforce la légitimité du recours aux connaissances de l'autre discipline.

Le choix de l'unité signifiante « triangle » pour représenter les molécules n'est pas anodin, car il fondait l'explication du volume plus important occupé par l'eau solide. Or, la règle : « les triangles ne peuvent se toucher que par un point » n'a pas été fournie aux élèves. Les élèves ont donc manipulé des triangles, et non des représentations de molécules. Lors de leur arrangement spatial, ils semblent oublier l'enjeu de la situation (expliquer l'augmentation du volume de l'eau lors du passage de l'état liquide à solide), même si la consigne est continuellement affichée au tableau et est rappelée lors de la discussion sur les productions. **Il est compliqué pour les élèves d'associer un registre sémiotique à un modèle physique lorsque les règles de manipulation de ce registre (implicitement en lien avec le modèle) ne sont pas fournies.** Dans cette situation, ce sont les règles issues de la construction mathématique des triangles qui étaient connues et mises en œuvre pour les disposer sur la feuille. Les autres règles utilisées sont issues des connaissances naïves des élèves.

<sup>83</sup> En superposant les disques les élèves enfreignent une règle implicite qui est que la disposition des disques est une représentation en deux dimensions de l'organisation spatiale des molécules.

Cette étude met en évidence le glissement entre l'enseignement d'un modèle physique et l'apprentissage de la manipulation de registres sémiotiques qui renvoient implicitement à d'autres modèles (ici mathématiques). Ce glissement a des répercussions sur la signification construite par les élèves à ces registres sémiotiques. Dans la situation présentée, les élèves n'ont pas eu l'occasion de traiter les situations dans les termes d'un modèle physique. Le modèle mathématique a été mobilisé pour agencer les représentations, en raison de l'articulation introduite par l'enseignant entre deux séances, les unités signifiantes étant construites en cours de mathématiques. Cette étude questionne sur les articulations entre disciplines d'enseignement mettant en jeu des registres sémiotiques communs, mais embarquant implicitement des propriétés associées à des modèles disciplinaires.

### 3.5 Trajectoire d'étude individuelle et trajectoire d'étude du groupe d'élèves

Dans la plupart de mes recherches j'ai considéré le groupe d'élèves comme une entité apprenante. Toutefois, j'ai constaté en étudiant les interactions au sein de groupes d'élèves que les productions finales ne faisaient pas toujours consensus<sup>84</sup>. J'ai donc profité de données collectées pour un projet international pour analyser les trajectoires d'études individuelles dans un groupe d'élèves. C'est au sein du projet Productive Multivocality évoqué dans la partie « méthodologie », que j'ai, en collaboration avec Kristine Lund, produit de telles analyses. Les données collectées comprenaient, des vidéos du groupe de quatre élèves (Agnès, Serena, Joël et Bruno), de la classe, de chaque élève et des enregistrements continus des productions sur l'interface tactile. J'ai ainsi étudié les activités de modélisation et registres sémiotiques utilisés et la manière dont l'accord au sein d'un groupe de quatre élèves se construit (Lund & Bécu-Robinault, 2013[14]).

Dans la séance analysée, les élèves devaient produire des dessins et réaliser des expériences avec des piles, des lampes et des fils, pour faire briller une ou des lampes. Au fur et à mesure, les élèves ajoutaient de nouveaux éléments (piles, fils ou lampes). La tâche est donc relativement proche de la première activité en électrocinétique du projet « collège ». Dans le projet Productive Multivocality, il s'agissait aussi d'une première séance en électricité et nous n'avons malheureusement pas eu accès aux données des séances suivantes. Après avoir produit individuellement une réponse sous forme d'un dessin, les élèves réalisent l'expérience, produisent un dessin pour le groupe et éventuellement d'autres dessins à expérimenter. Les élèves convertissent ainsi les dessins en gestes et réciproquement, en articulant les objets et événements avec le modèle en cours d'élaboration. Nous avons analysé les productions des élèves (discours, gestes, expériences, dessins) au cours des 40 minutes de cette séance et nous avons construit l'évolution des faisceaux sémiotiques (Arzarello, 2006 ; Bécu-Robinault & Lund, 2009, 2012[12]) des élèves en les comparant au savoir académique<sup>85</sup>.


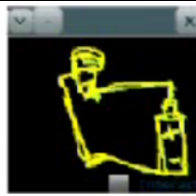
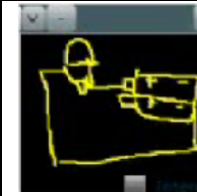
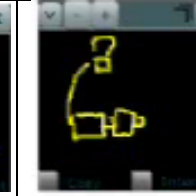
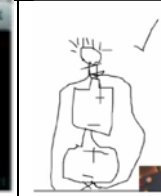

L'enregistrement des actions des élèves sur les interfaces tactiles ainsi que les dessins des autres groupes consultés donnent à voir l'évolution des réponses produites. Je me focaliserai sur les productions d'un élève, Bruno, qui est, dès le début de la séance, en désaccord avec le reste du groupe (Tableau 9).

**Tableau 9: l'évolution des dessins produits et consultés par Bruno**

<sup>84</sup> Ce constat a notamment été possible lorsque j'ai collecté les cahiers des élèves. Les réponses conservées n'étaient pas toujours identiques d'un élève à l'autre, alors qu'un consensus semblait émerger à l'oral.

<sup>85</sup> Ce savoir académique est le savoir scolaire visé par l'enseignante à travers les activités proposées.



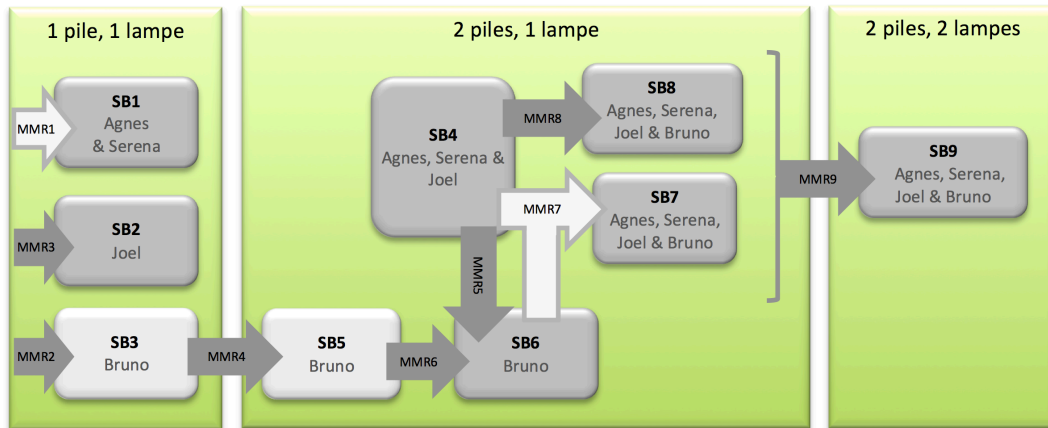
| Le dessin n°1 de Bruno                                                            | Le dessin n°2 de Bruno                                                            | Le dessin n°3 de Bruno                                                            | Agnes commence un dessin (n°4) sur l'espace personnel de Bruno                     | Serena montre le dessin d'un autre groupe                                           | Bruno termine le dessin d'Agnès : le dessin n°4 de Bruno et Agnès                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |  |

L'examen du dessin n°1 indique que Bruno ne distingue par le culot du plot de la lampe. Les deux fils touchent une même zone, le plot. La correction qu'il apporte dans le dessin n°2 distingue les deux zones, qui du point de vue du modèle électrocinétique peuvent être associées aux deux bornes de la lampe. Toutefois, comme sur le dessin n°1, le fil de connexion à la borne inférieure de la pile ne paraît pas réellement toucher la borne négative de celle-ci, seulement sa partie plate inférieure. Les deux bornes de la pile ne semblent pas encore clairement identifiées. Cela se confirme avec le dessin n°3, puisque si les fils touchent les deux bornes de la lampe, ce n'est pas le cas pour les piles, montées « en parallèle », au sens commun : les piles sont collées l'une à l'autre, un des fils touche la partie plate inférieure de cet assemblage, l'autre part d'une borne positive. Ce dessin révèle que Bruno ne parvient pas encore à concevoir un circuit électrique comme une chaîne ininterrompue de conducteurs comportant au moins un générateur. Ce dessin n°3, non conforme aux dessins produits par les autres élèves du groupe, interpelle l'une d'entre eux, Agnès. Après avoir réalisé l'expérience, elle commence un nouveau dessin sur la tablette de Bruno, dans lequel les piles sont placées en série, au sens physique du terme. Dans le même temps, Bruno réalise l'expérience correspondant à son dessin n°3, sans succès. Une autre élève montre le dessin produit par un autre groupe, dans lequel le plot de la lampe est directement placé sur la borne positive, et deux fils partent de la borne négative vers le culot. Bruno finit par compléter le dessin initié par Agnès. Le Tableau 9 met en évidence que **même si les élèves produisent individuellement des réponses, l'apport des autres élèves peut être capital pour changer de point de vue, à la fois sur la représentation sémiotique statique de la situation** (ici sous forme de dessin) **mais aussi sur les modes sémiotiques dynamiques** (ici les gestes pour réaliser l'expérience). L'évolution des dessins matérialise les modélisations successives d'un élève dans un groupe et reflète l'influence des productions du groupe sur la modélisation de cet élève.

L'analyse des échanges et des productions au cours de cette séance met en évidence les évolutions de chacun pour parvenir à une production commune. C'est ce qui est représenté sur la Figure 69, découpant la séance en trois grands épisodes : le premier est relatif au circuit électrique simple (une lampe, une pile), le deuxième à un circuit comportant deux piles et une lampe, et le troisième à deux piles, deux lampes. Ce découpage s'appuie sur les savoirs à mobiliser sur les générateurs et récepteurs : organisation dans le circuit, connections. C'est donc une analyse en termes de modélisation, fondée sur le modèle électrocinétique en cours d'étude, associée aux faisceaux sémiotiques, qui a piloté le découpage. D'autres découpages sont possibles et présentés dans l'ouvrage collectif issu de ce projet (Suthers & al., 2013). Nos épisodes correspondent ainsi à trois situations à la complexité croissante.

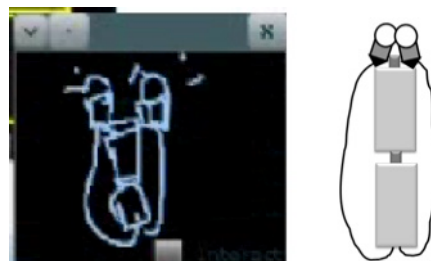
Pour analyser les interactions au sein du groupe d'élèves, nous avons regroupé les interventions et productions en faisceaux sémiotiques : chacun des neuf faisceaux, notés SB1 à SB9 (Semiotic Bundles 1 à 9) sur la Figure 69 intègre l'analyse en termes de registres sémiotiques des interactions, des productions sur la tablette tactile et des objets manipulés. Chaque faisceau sémiotique est attribué à un élève travaillant individuellement ou au groupe d'élèves collaborant pour produire une réponse. Tous

les faisceaux sémiotiques reconstruits sont composés des registres suivants : langue naturelle, dessin et gestes. Nous avons ensuite identifié les reformulations multimodales permettant aux élèves de faire évoluer les faisceaux sémiotiques (ajout de nouveaux éléments, comme une deuxième lampe ou une deuxième pile ; modification dans la manière de connecter les différents composants du circuit).



**Figure 69: les faisceaux sémiotiques (tous composés de langue naturelle, dessin et gestes) des élèves au fil de la séance : en gris foncé, les faisceaux sémiotiques (Semiotic Bundles SB sur la figure) cohérents avec le point de vue de la physique, en gris clair, les faisceaux sémiotiques non conformes à la physique. Les flèches gris foncé représentent les reformulations multimodales du geste vers le dessin, le flèches en blanc sont les reformulations multimodales du dessin vers le geste (MMR= Multimodal Reformulation).**

En haut à gauche de la Figure 69, Agnès et Serena construisent un faisceau sémiotique (SB1) sur la base de reformulations multimodales (MMR1). Ce premier faisceau étant en accord avec le savoir académique, elles connectent ensuite efficacement une pile à une lampe. Les deux garçons du groupe, Bruno et Joël travaillent alors individuellement. Malgré les reformulations multimodales (MMR2), le faisceau sémiotique de Bruno (SB3) n'est pas cohérent avec les savoirs académiques. De son côté, Joël, travaillant seul, ne parvient pas avant la reformulation multimodale MMR3 à construire un faisceau sémiotique cohérent avec la physique (SB2). A partir de ce moment, Joël travaille conjointement avec Agnès et Serena à l'élaboration d'un faisceau sémiotique (SB4), pour connecter deux piles à une lampe. Bruno continue de travailler seul. Selon le Tableau 9, ses difficultés tiennent essentiellement à l'absence d'identification de la borne négative de la pile. Ces difficultés vont l'empêcher de produire un faisceau sémiotique compatible avec le savoir académique jusqu'à ce qu'Agnès initie le dessin n°4 (Tableau 9), que Bruno complète pour aboutir au faisceau sémiotique SB6. A partir de ce moment, Bruno va collaborer avec le reste du groupe (SB7, SB8 et SB9). Le faisceau sémiotique élaboré en fin de séance est relativement complexe (Figure 70).



**Figure 70 : le dessin du groupe pour connecter deux lampes à deux piles (élément du faisceau sémiotique SB 9) – à droite, une reproduction faisant apparaître la manière dont les objets sont connectés sur le dessin et lors de la manipulation**

En Figure 71, on visualise Agnès suggérant l'utilisation du dessin d'un autre groupe, ce qui va provoquer une reformulation multimodale (du dessin vers les gestes) du groupe pour aboutir au faisceau sémiotique SB7. En parallèle, Agnès initie rapidement un dessin de leur manipulation, et donc un faisceau sémiotique équivalent (SB8). Ce dernier faisceau sémiotique fait implicitement consensus dès sa publication sur l'espace public de travail.



Figure 71: les gestes et le dessin associés au faisceau sémiotique SB7

Cette coordination des registres à travers les reformulations multimodales fait peu à peu évoluer le groupe d'élèves, dont Bruno, vers un faisceau sémiotique en conformité avec le modèle électrocinétique. Ainsi, **les reformulations multimodales semblent partiellement à l'origine de l'évolution des faisceaux sémiotiques. Cette évolution peut conduire à augmenter la complexité des faisceaux sémiotiques et leur cohérence du point de vue du savoir académique.**

Tout au long des reformulations et de la complexification des faisceaux sémiotiques, les élèves passent de la manipulation des objets au dessin, ce qui implique des coordinations de modes et de registres sémiotiques, en lien avec le modèle physique. Sur la base de consignes très ouvertes, l'activité collaborative de manipulation et de représentation d'un circuit électrique a donc favorisé l'émergence et la complexification progressive d'un faisceau sémiotique. Lorsque les élèves complexifient le faisceau sémiotique, leurs modélisations vont dans le sens d'une plus grande conformité avec le modèle de l'électrocinétique.

## 4 Résultats sur les pratiques d'étude et d'enseignement

Si la sensibilisation des élèves à la notion de modèle est importante pour la compréhension de la physique, les enseignants rencontrent également des difficultés à s'appropriier cette notion, rarement mise en œuvre dans l'enseignement secondaire. Ces difficultés ont été étudiées tant au niveau international qu'en France. Van Driel et Verloop (1999) précisent que les enseignants ont une connaissance des modèles et de la modélisation souvent limitée, « *teachers usually present the models to be learned as static facts* » (Ibid., p 1141), ce qui tend à limiter l'intérêt des processus de modélisation, avec des articulations construites progressivement entre le monde des objets et événements et celui des théories et modèles. Pour Justi (2009), les enseignants ne manquent pas tant de connaissances sur les modèles scientifiques que sur la façon de d'utiliser la modélisation en classe. Une interprétation tient dans la méconnaissance des enseignants du rôle de la modélisation, en tant que processus d'élaboration des connaissances scientifiques. « *There is little evidence to suggest that the majority of science teachers have an in-depth knowledge of the importance of modelling in science, and about the manner in which scientists*

*use models* » (Henze, Van Driel & Verloop, 2007, p. 1823). Ainsi, Morge et Doly (2013) indiquent que les enseignants s'appuient souvent sur des référents empiriques perceptibles, qu'ils ne cherchent pas à rompre une relation univoque entre le modèle et la réalité représentée et qu'ils ne choisissent pas de modèles s'écartant de la réalité. Cela a pour conséquence de renforcer la confusion entre le modèle et la réalité dont il est sensé rendre compte (Justi & Gilbert, 2002).

Cette difficulté des enseignants questionne les séquences d'enseignement élaborées au sein des groupes DBR, engageant les élèves à mobiliser, élaborer des modèles sous l'impulsion des consignes de l'enseignant. L'évolution des méthodologies vidéo, décrite au chapitre précédent de cette note de synthèse, rend possible les analyses des pratiques d'études et d'enseignement. Aussi, dans cette partie, je synthétise quelques résultats de recherche, fondés à mon cadre épistémico-sémiotique et concernant l'action de l'enseignant combinée à celle des élèves. Après avoir présenté la dissymétrie entre les deux acteurs, je présenterai comment l'enseignant ajuste son discours en classe pour aider à la compréhension des consignes écrites. Les connaissances des élèves s'ancrant parfois dans d'autres disciplines, je présenterai l'analyse d'une situation dans laquelle enseignant et élèves gèrent deux modèles en compétition pour expliquer une même situation. Enfin, les interactions étant multimodales, j'exposerai une étude où le geste est utilisé comme support pour introduire des informations relatives au modèle à enseigner.

#### **4.1 Une dissymétrie des interlocuteurs en termes de niveau de modélisation et de faisceau sémiotique**

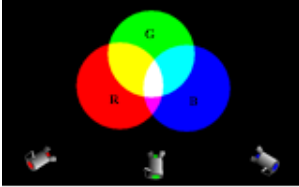

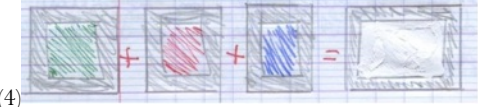
Toute situation d'interaction à des fins d'apprentissage suppose une dissymétrie des interlocuteurs en termes de savoirs (Goffard & Dumas-Carré, 1993). « *Sans l'hypothèse de cette dissymétrie, le système didactique n'a pas lieu d'être* » (Margolinas, 1992, p. 125). Cette dissymétrie appelle à des ajustements du discours visant à l'intercompréhension. Le discours des enseignants de physique n'échappe pas à ces ajustements, qui passent le plus souvent par des reformulations, telles que celles qui transforment les dires d'élèves en d'autres expressions plus conventionnelles (Chouinard & Clark, 2003). Selon Apotheloz (2001, p.62) la reformulation consiste « *à exhiber continûment, c'est-à-dire à chaque pas, la manière dont ce qui est formulé s'articule à ce qui a déjà été formulé* ». Dans mes recherches, j'ai considéré que « *toute reformulation revient sur un énoncé antérieur pour l'envisager à nouveau ou de nouveau sous un autre aspect, en fonction de telle nouvelle situation, de telle phase de l'activité, ou, plus généralement, en fonction du but didactique suivi* » (Rabatel, 2010, p. 10). Comme je l'ai exposé dans le chapitre 4, une variété de modalités de communication peut être mobilisée par les enseignants selon les objets à leur disposition et comment ils souhaitent les présenter. Ainsi, les reformulations mobilisent une variété de modalités de communications et ont pour principal objectif d'aider les élèves à comprendre les éléments du discours qui seraient apparus hors de portée de leurs capacités de compréhension. De ce fait, j'ai choisi de focaliser mes analyses sur ces reformulations multimodales, moments clés des interactions, lors desquels l'enseignant manifeste une perception de la dissymétrie des interlocuteurs en termes de savoirs.

J'ai analysé de nombreux épisodes de reformulations, essentiellement avec Kristine Lund (par exemple, Bécu-Robinault & Lund, 2009 ; Lund & Bécu-Robinault, 2010a[8] ; 2010b[10]). A titre d'exemple, je présente ici une interprétation, dans les termes de mon cadre épistémico-sémiotique, d'une reformulation gestuelle d'un enseignant pour aider des élèves à élaborer une expérience sur la synthèse additive (Bécu-Robinault & Lund, 2011 ; Bécu-Robinault & Lund, 2012[12]). Les résultats sur les pratiques d'étude ont été présentés dans le paragraphe 3.3.2 de ce même chapitre, p. 154) : après avoir

produit de la lumière blanche avec une simulation informatique (Visiolab<sup>86</sup>) en croisant les faisceaux de trois spots, rouge vert et bleu, les élèves doivent imaginer une expérience réelle<sup>87</sup>, pour obtenir le même résultat avec le matériel habituellement disponible en classe.

Les élèves suggèrent alors d'utiliser trois filtres colorés et de les assembler en un paquet. Cette réponse n'étant pas conforme aux attentes de l'enseignant, ce dernier va déplacer le centre d'intérêt des élèves, à savoir les filtres à utiliser, vers les lumières colorées, et mimer les positions spatiales des faisceaux de lumières colorées de façon à ce que les trois faisceaux se superposent. La gestuelle de l'enseignant en réponse à celle des élèves (Tableau 10) met en évidence une divergence entre le niveau de modélisation employé par l'enseignant (le modèle physique) et celui auquel les élèves se réfèrent (les objets et les événements). En effet, la position des mains de l'enseignant correspond à la forme d'un faisceau convergent. Il est à noter que cette forme de faisceau convergent est obtenue que lorsqu'un faisceau traverse une lentille convergente, ce qui n'a pas encore été étudié par les élèves. Par ailleurs, les cercles dessinés par l'enseignant au tableau lors de la correction en classe entière, se rapportant aux cercles manipulés sur le logiciel de simulation, ne sont obtenus que si l'on place un écran après la lentille (à une distance différente de la distance focale si on veut obtenir une tâche ressemblant au rond coloré de la simulation). Ainsi, tous les registres sémiotiques utilisés par l'enseignant sont associés au niveau du modèle physique. Les gestes des élèves concernent uniquement la disposition spatiale des objets à utiliser pour produire la lumière blanche. Leur production (registre sémiotique « dessin ») est également une représentation des objets (filtres) pour réaliser l'expérience. En conséquence, tous les registres sémiotiques mobilisés par les élèves sont associés au niveau des objets et événements. **La reformulation de l'enseignant, dans le but d'aider les élèves, fait apparaître une dissymétrie entre les interlocuteurs, tant du point de vue des niveaux de modélisation que des registres sémiotiques.**

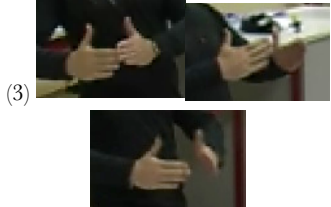

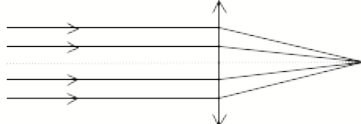
**Tableau 10: les faisceaux sémiotiques de l'enseignant et des élèves au moment de la reformulation multimodale.**

|                   | enseignant                                                                                      | élèves                                                                                          |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Référence commune |  <p>(1)</p> |                                                                                                 |
| Dessins           |  <p>(5)</p>  |  <p>(4)</p> |

<sup>86</sup> Pour une présentation détaillée du contenu de cette simulation, voir plus loin, paragraphe 4.3.2

<sup>87</sup> Ce terme vient pour différencier l'expérience sur les objets matériels (expérience réelle) de l'expérience sur les objets représentés (expérience simulée).



|                 |                                                                                                                                                  |                                                                                    |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Gestes          |                                                                 |  |
| Discours        | (5) On va faire trois petits cercles un cercle bleu un cercle rouge et un cercle vert [...] il s'agit de lumières colorées rouge verte et bleue. | (4)<br>E2: on les [filtres] superpose<br>E3: l'un derrière l'autre                 |
| Modèle physique |                                                                 |                                                                                    |

Cette reformulation multimodale, supposée fournir aux élèves l'aide nécessaire à la construction d'une réponse correcte, complexifie le faisceau sémiotique en cours d'élaboration. Le faisceau de l'enseignant s'articule autour d'un modèle physique, celui des élèves autour des objets et événements. A l'issue de cette reformulation, les élèves parviennent à conclure qu'il faut trois lumières distinctes, non disponibles dans la classe. La référence au modèle de l'optique géométrique, rendue visible par la modalité sémiotique « geste » pour mimer des faisceaux convergents, semble donc les avoir aidé. A l'occasion d'autres recherches sur les séances d'électricité (Lund & Bécu-Robinault, 2010a[8]), j'avais constaté que la distance entre les éléments de savoir invoqués par l'enseignant, *via* les différents registres sémiotiques, et les connaissances des élèves n'était pas un obstacle à la compréhension du discours de l'enseignant.

Par ailleurs, l'analyse révèle que le faisceau sémiotique de l'enseignant est très cohérent, car il repose sur un modèle physique qui sera présenté lors des prochaines séances. Celui des élèves, en construction, l'est beaucoup moins, même si des cohérences locales peuvent être trouvées. Les éléments apportés par l'enseignant viennent le complexifier. Si l'enseignant est capable de passer d'un ensemble sémiotique à l'autre, cela n'est pas le cas pour l'élève qui n'a pas encore à sa disposition le modèle physique adéquat. **La cohérence d'un faisceau sémiotique construit par les élèves semble donc devoir être mise à l'épreuve pour ensuite évoluer vers la construction d'un modèle scientifique.** Cette mise à l'épreuve passe par une dissymétrie des interlocuteurs, à propos de la connaissance des modèles et de l'articulation des niveaux de modélisation. Cette dissymétrie est rendue perceptible, au moins au chercheur, à travers les contenus des registres sémiotiques.

## 4.2 Ajustements du discours, paroles et gestes pour l'aide à la compréhension de la consigne écrite

Dans cette partie, je présente une recherche sur les reformulations liées à des ajustements du discours. Ces ajustements visent le plus souvent à réguler les problèmes de compréhension ou de mise en œuvre de la consigne écrite. Cette recherche a fait l'objet de plusieurs publications (Bécu-Robinault & Lund, 2009 ; Lund & Bécu-Robinault, 2010a[8] ; 2010b[10]) dans lesquelles le rôle des reformulations a été analysé au regard des difficultés des élèves, en se fondant sur les dimensions sémiotiques et les modalités de production associées.



L'analyse des reformulations en classe a donné fréquemment lieu à des modifications des consignes alors que les documents pour la classe avaient fait l'objet d'un consensus préalable dans le groupe collaboratif DBR. Par ailleurs, les enregistrements vidéo et les questionnaires indiquaient que les enseignants passaient, avant ou lors de la distribution des consignes, un temps non négligeable à la présentation des activités développées. La reformulation des instructions par l'enseignant se faisant au détriment d'autres actions ou interactions, et le temps étant compté, il est raisonnable de postuler que ces moments constituent, pour les élèves, des aides essentielles à la compréhension de la tâche à réaliser. Je reprends ici l'analyse d'un extrait en début de séance.

Cet extrait est tiré de la séquence d'électrocinétique en cinquième et se situe juste après la lecture de l'analogie des camionnettes (première version de l'analogie, présentée au chapitre 5). Les élèves doivent expliciter les correspondances entre domaine cible (celui que l'on souhaite que les élèves apprennent, *i.e.* l'électricité) et domaine de référence (celui que les élèves maîtrisent, *i.e.* l'analogie des camionnettes et des pains). Se pose alors le problème de l'analogie du courant électrique. L'enseignante mobilise alors le registre sémiotique de la langue naturelle (modalité parole selon Kress & Van Leeuwen, 2001) et la modalité sémiotique geste tout en demandant aux élèves de se référer au registre sémiotique dessin représentant l'analogie.

Nous avons postulé que les informations différentes portées par le registre du dessin et le couple sémiotique geste-parole<sup>88</sup> de l'analogie pouvaient nuire à la construction d'un faisceau sémiotique intégrant de manière cohérente les deux analogues. Pourtant, il s'agit bien, pour l'enseignante, d'aider les élèves à intégrer les ensembles sémiotiques en un faisceau sémiotique qui assurera une unité forte entre les analogues. Ainsi, **les relations assurant l'unité et la cohérence de ce faisceau sémiotique sont assurées par les différents modes et registres sémiotiques introduits par l'enseignante** (la parole, les gestes et les écrits distribués en début de séance explicitant les correspondances entre les analogues).

L'enseignante s'assure régulièrement que les élèves ont compris que les camionnettes (et donc le courant électrique) circulent tout au long du circuit : le courant électrique correspond à la file des camionnettes en mouvement. En insistant sur cette circulation, elle expose une vision dynamique du courant électrique qu'il n'est pas possible de voir sur la seule base du dessin ou du schéma électrique. Par la reformulation gestuelle du texte et du schéma distribués, elle trouve une heuristique pour lutter contre une conception séquentielle du circuit électrique (Closset, 1989 ; Missonier & Closset, 2004). Elle insiste, en reproduisant à onze reprises un geste dynamique circulaire (Figure 72), mimant un mouvement d'ensemble des camions, associé à une verbalisation soutenant une vision systémique du circuit (Tableau 11) : elle parle de « la file des camions », « l'ensemble des camions ». Elle veille à ce que les élèves ne parlent des camions qu'au pluriel : si un camion s'arrête, c'est toute la file des camions qui est arrêtée. La mise en relation de cette animation gestuelle rythmée de l'analogie et de sa description papier, servant de référence pour produire les gestes, est un moyen pour la construction dynamique d'une généralité à partir de cas particuliers (Radford & al., 2007). Ainsi, en produisant ce mouvement répété de la main, l'enseignante fournit aux élèves une représentation visuelle et sensori-motrice de l'analogie pour mieux imaginer sa mise en œuvre ultérieure. En associant par la suite la circulation des camions à la circulation du courant électrique, elle espère que le courant électrique sera bien conceptualisé dans une vision systémique. **Le recours à une modalité sémiotique telle que**

---

<sup>88</sup> Pour rappel, le mode sémiotique « geste » est toujours analysé conjointement à la parole.

**le geste assure à la fois une vision dynamique du modèle et une véritable incarnation des connaissances à mobiliser.**



Figure 72: le geste circulaire produit par l'enseignante (la flèche indique le sens de rotation)

Tableau 11: la transcription du discours et la description des gestes produits par les élèves et l'enseignante lors de la reformulation du document écrit

| Temps | Discours                                                                                                                                                       | Gestes                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7'33  | P : le courant électrique peut peut circuler<br>d'accord et ce courant électrique c'est qui dans l'analogie des camionnettes ^                                 | trace un cercle avec sa main, puis en trace un autre<br>trace rapidement un plus petit cercle avec sa main<br>lève la main droite pour indiquer le changement de domaine<br>électricité – analogie                                                                                                |
|       | E : les camions                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|       | P : alors oui ^                                                                                                                                                | pointe le doigt vers un élève                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|       | E : la file des camionnettes                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 7'43  | P : la file des camions très bien<br>c'est la file des camions<br>hein c'est le fait<br>c'est la circulation des camions<br>les camions<br>sont en circulation | trace un cercle avec la main<br>trace un cercle avec la main, puis trace un autre cercle<br>trace un cercle avec la main<br>trace un demi-cercle, fait une pause en bas<br>termine son cercle<br>trace un demi-cercle avec la main, fait une pause entre le bas<br>et le haut, termine son cercle |
| 7'52  | donc le courant électrique circule<br>d'accord c'est l'ensemble des camions<br>qui circule très bien                                                           | trace un cercle, fait une pause entre le bas et le haut<br>trace un cercle presque complet avec sa main)                                                                                                                                                                                          |

L'analyse de la vidéo montre que l'enseignante marque des temps de pause dans le tracé du cercle. Les positions spatiales de ces pauses ne sont pas fortuites : la comparaison de ces gestes avec le dessin de l'analogie révèle que les brefs arrêts dans le geste circulaire, correspondent aux emplacements de la boulangerie et du supermarché sur le dessin. Elle reprend ainsi par un couple geste-parole des informations fournies initialement dans le registre sémiotique « dessin ». Les pauses sont des indicateurs de la cohérence des deux ensembles sémiotiques mis en relation dans l'analogie. **Par les modalités sémiotiques geste et parole, l'enseignante tente de faire construire aux élèves des relations visant à leur faciliter l'élaboration d'un faisceau sémiotique.**

Au début de cet extrait, l'enseignante passe d'un analogue à l'autre : elle parle initialement de l'électricité, puis de la file de camionnettes. Pour marquer ce changement de domaines (de cible à

référence), qui est déjà une reformulation de ce qu'il se passe dans un circuit électrique vers ce qui se passe dans le circuit des camionnettes, elle fait un geste lent de droite à gauche avec la main à plat, comme si elle repoussait physiquement le domaine de l'électricité sur le côté pour ne plus parler que de l'analogie des camionnettes. Elle va ensuite faire un geste identique (un cercle avec sa main) pour mimer la circulation du courant électrique ou des camionnettes. Cette identité des gestes marque la volonté inconsciente de l'enseignante à minimiser la distance sémantique introduite lors de la reformulation de la circulation de l'électricité en circulation des camionnettes. Cette identité des gestes est conjointe à une identité du vocabulaire employé (dans cette séance le mot est « circuler », dans des séances ultérieures, il pourra s'agir de charger, d'alimenter...). Ainsi, même si l'enseignante a recours à des modalités sémiotiques variées, les contenus des registres, ici la langue naturelle, restent stables au cours des interactions. Comme il n'y a pas d'encodage de nouveaux matériels linguistiques (ni oral ni gestuel), il est probable que l'enseignante souligne l'identité des deux analogues.

Le concept de faisceau sémiotique s'avère pertinent pour décrire de manière dynamique comment l'enseignante prend en charge les difficultés des élèves à travers les reformulations. Lorsqu'elle met l'accent sur la vision systémique du circuit, la reformulation fait émerger les caractéristiques saillantes d'un savoir co-construit en interaction. Ce type de reformulation permet d'articuler les éléments de savoir en jeu et peut donc être qualifié d'efficace pour traiter les difficultés des élèves.

Une analyse similaire, en formation des maîtres (Lund & Bécu-Robinault, 2010a[8]) montre que, lorsque les enseignants tentent de comprendre les difficultés d'apprentissage des élèves à partir de vidéos de classe, ils utilisent aussi des reformulations multimodales faisant émerger les caractéristiques saillantes. Cette étude sur les ajustements opérés à travers les reformulations serait à poursuivre afin de caractériser plus généralement les types de reformulations qui aident les élèves à dépasser leurs difficultés d'apprentissage.

### 4.3 Gestion des modèles et registres sémiotiques issus d'autres disciplines

Dans cette partie, je reprends des analyses de la séance sur la synthèse additive. La mise en œuvre de cette séance et les difficultés rencontrées par l'enseignant et les élèves ont fait l'objet d'une recherche conduite avec Shirley Takeco Gobara<sup>89</sup>, chercheure invitée au sein de l'UMR ICAR en 2009. Les résultats ont été ensuite communiqués et publiés (Bécu-Robinault & Gobara, 2010[9]). Je présente ici des difficultés rencontrées par l'enseignant.

#### 4.3.1 Les modèles en jeu dans la séance : compétition entre modèle enseigné en physique et modèle enseigné en arts plastiques

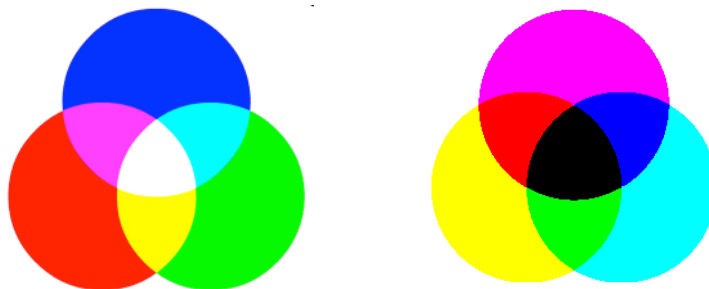
Le modèle de la synthèse additive est en contradiction, au sens de Walliser (1977), avec le modèle de la synthèse soustractive, qui sera enseigné ultérieurement en physique. Ce dernier a toutefois été enseigné préalablement en arts plastiques : « *la peinture est couleur et matière. [...] la couleur est substance et lumière, matérielle et immatérielle. Elle est perçue immédiatement par le spectateur. [...] L'élève] découvrira le spectre coloré et quelques systèmes d'organisation des couleurs élaborés par les peintres. En apprenant à choisir et fabriquer ses propres couleurs, il expérimentera leurs potentiels sensoriels, représentatif, symbolique et expressif* » (MEN, 2008b, p. 3). Ainsi,

---

<sup>89</sup> Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brésil

le modèle de la synthèse soustractive, par ailleurs souvent utilisé dans la vie quotidienne, a donc également un statut de savoir enseigné.

Les représentations sémiotiques usuelles (schéma) de ces deux modèles sont très semblables du point de vue de la forme : des ronds colorés qui se recouvrent partiellement (Figure 73). **Une représentation sémiotique n'est donc pas toujours associée à un seul modèle physique, et peut renvoyer implicitement à un modèle d'une autre discipline.**



**Figure 73: les représentations usuelles des modèles additif (à gauche) et soustractif (à droite) de la lumière**

Ces deux schémas se distinguent essentiellement par la couleur figurant au centre : blanc pour la synthèse additive, noir pour la synthèse soustractive. Toutes les autres couleurs sont identiques, seule leur position sur le schéma qui est différente. Or, la position sur le schéma ne précise pas ce que sont ce que représentent ces couleurs, à savoir des lumières pour la synthèse additive (à gauche), de la matière pour la synthèse soustractive (à droite).

Ces deux modèles peuvent être différenciés sur la base du vocabulaire associé, et donc des contenus du registre sémiotique langue naturelle : ainsi, la substantivation de l'adjectif qualifiant la couleur « le rouge » « le bleu » tend à la matérialiser, la couleur étant alors un objet (modèle soustractif). La formulation « lumière colorée rouge » désigne explicitement la lumière (modèle additif). Le terme « mélanger » fait référence implicitement à des matières et donc au modèle soustractif. Certaines formulations sont par contre ambiguës sur ce qui est désigné (lumière ou matière) : « rouge », « additionner »... Ce registre sémiotique de la langue naturelle est donc un support à la distinction des deux modèles.

#### 4.3.2 Analyse épistémo-sémiotique du logiciel de simulation

Dans cette activité, le groupe collaboratif DBR avait fait le choix d'utiliser un logiciel de simulation pour deux raisons :

- d'une part les filtres à disposition dans les collèges sont souvent de qualité médiocre et la superposition des lumières colorées rouge, verte et bleue à partir de ces filtres ne forme pas de la lumière blanche ;
- d'autre part, le C2i comporte un item (C.3.6) lié aux limites des outils de simulation.

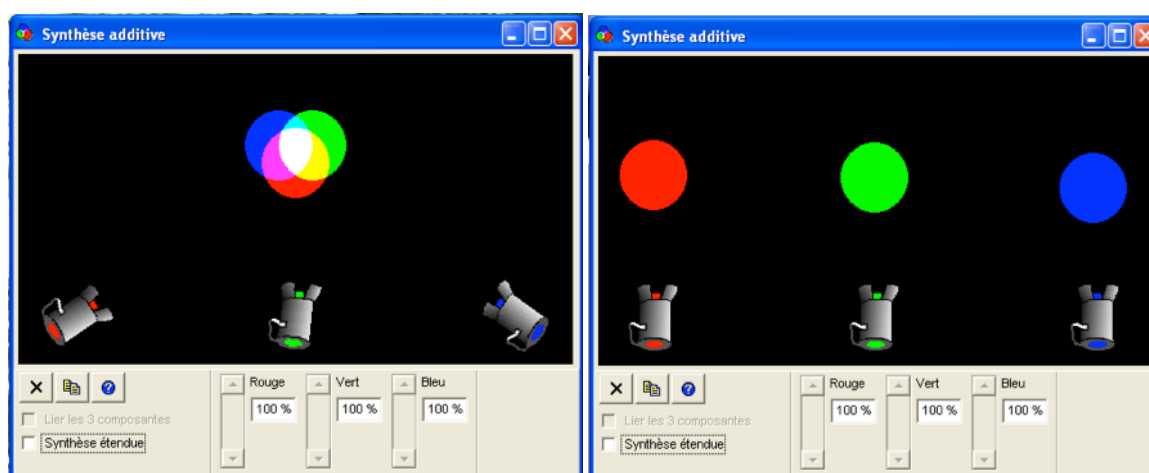
Les observations avec la simulation et le matériel habituellement manipulé étant discordantes<sup>90</sup>, l'activité a pour ambition de montrer aux élèves qu'une simulation reproduit les résultats d'une

---

<sup>90</sup> Les filtres utilisés en classe sont souvent de mauvaise qualité, il est donc difficile, si ce n'est impossible, de produire de la lumière blanche.

expérience réelle dans des conditions idéales (une simulation produit des résultats strictement conforme au modèle physique). Après examen des logiciels libres sur la synthèse additive, le choix des enseignants s'est initialement porté sur Visiolab<sup>91</sup>, laissant envisager des usages pour une activité ultérieure.

A l'ouverture de la partie « synthèse trichromique additive » du logiciel, un écran s'affiche, avec trois lumières colorées rouge, verte et bleue superposées comme indiqué sur la Figure 74, à gauche. Aucune indication n'est fournie pour expliquer ce qui est visualisé : des ronds colorés sur un fond noir et des projecteurs dans la partie inférieure de l'écran. Les élèves ne sont pas censés modifier le paramétrage par défaut des quantités de lumières (synthèse étendue), même si le bilan qui sera dressé de l'activité fait référence à la quantité de lumière. Pour déplacer un rond – figurant une lumière colorée – il faut placer la souris dessus, et la déplacer. L'orientation du projecteur est alors modifiée pour s'aligner avec le rond coloré (Figure 74, à droite).



**Figure 74 : deux copies d'écran de la fenêtre de la simulation de la synthèse additive dans Visiolab : à gauche, la fenêtre à l'ouverture avec les lumières superposées, à droite, la fenêtre après séparation des lumières colorées**

Une analyse *a priori* de ce logiciel a été réalisée afin d'anticiper les difficultés de l'enseignant et des élèves lors de la présentation et des observations.

Le fond sur lequel apparaissent les taches colorées (lumières) est noir. En fait, ce qui est simulé sur le logiciel est un écran blanc, dans une pièce non éclairée. Seuls les faisceaux des lumières projetées sur l'écran diffusant apparaissent. Les concepteurs ont certainement opéré ce choix pour que la lumière blanche obtenue par superposition des trois lumières colorées rouge, verte et bleue apparaisse comme un résultat de la superposition et non comme la couleur « naturelle » de l'écran.

A l'ouverture, les lumières sont déjà superposées et les taches sont disposées conformément aux représentations usuelles de la synthèse additive (Figure 73). Les élèves visualisent donc immédiatement le résultat, sans manipulation, ce qui limite l'intérêt de la simulation : la présentation d'une photo fournirait des observations identiques. En conséquence, nous avons convenu de lancer la simulation avant l'arrivée des élèves et de séparer les tâches de lumières colorées.

<sup>91</sup> <http://sciencesphi.free.fr/logiciels/VisioLab.zip>

Le lien entre les taches colorées et les spots n'est pas évident, du fait de la représentation « à plat » des spots et des taches (elles devraient être perpendiculaires l'une à l'autre pour obtenir un rond parfait). Ce lien est établi quand on bouge les taches, et que le spot s'oriente automatiquement. Or, il est difficile de regarder simultanément deux lieux distincts. Les actions à réaliser portant sur les ronds colorés, non sur les spots, les gestes des élèves se concentrent uniquement sur ces ronds. Ils les manipulent comme des taches de peinture, et non de lumière. Cela peut les conduire à oublier que le modèle en jeu, à ce moment de l'enseignement, concerne les lumières colorées, non aux couleurs des objets. Il est donc essentiel que les consignes focalisent l'attention des élèves sur les spots de lumières.

#### 4.3.3 Les modèles en jeu dans le texte des activités distribué aux élèves

Lors de la première implémentation des activités, les enseignants appréhendaient que les termes qualifiant les couleurs obtenues par superposition des lumières colorées rouge, verte et bleue ne soient pas connus des élèves. Aussi, les élèves devaient compléter un tableau, comme indiqué par la Figure 75. Si la forme de la réponse s'apparente au registre sémiotique « tableau », c'est le registre de la langue naturelle qui est utilisé pour les prévisions, et les registres « dessin » et « langue naturelle » pour les observations.

Le tableau des observations introduit une ambiguïté quant au modèle à mobiliser, en raison du registre sémiotique « dessin » introduit pour indiquer la couleur de la lumière obtenue : en effet, les élèves doivent colorier la case avec la couleur de cette lumière, et donc utiliser de la couleur matière pour représenter la couleur de la lumière. Ce registre sémiotique légitime implicitement le recours au modèle de la synthèse soustractive. Ainsi, la **prescription d'un registre sémiotique peut implicitement induire le choix d'un modèle spécifique pour l'interprétation des observations**. L'intérêt des itérations successives au sein de la méthodologie Design-Based Research a résidé dans la possibilité de modifier ce texte dans sa version suivante afin qu'il ne soit plus équivoque quant au modèle à adopter.

| Lumières des spots |      |      | Lumière colorée obtenue |  |
|--------------------|------|------|-------------------------|--|
| Rouge              | Vert | Bleu |                         |  |
| X                  | X    |      | marron                  |  |
| X                  |      | X    | violet                  |  |
|                    | X    | X    | turquoise               |  |
| X                  | X    | X    | noir                    |  |

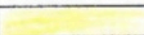



| Lumières des spots |      |      | Lumière colorée formée                                                               |                   |
|--------------------|------|------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Rouge              | Vert | Bleu | Colorez la case                                                                      | Nom de la couleur |
| X                  | X    |      |  | jaune             |
| X                  |      | X    |  | violet            |
|                    | X    | X    |  | turquoise         |
| X                  | X    | X    |  | blanc             |

Figure 75 : les tableaux à compléter par les élèves : en haut le tableau pour les prévisions, en bas le tableau pour indiquer les observations réalisées sur la simulation.

#### 4.3.4 Les modèles en jeu dans le bilan de l'enseignant

Je reprends ici la dernière phase de l'activité, au cours de laquelle l'enseignant organise une discussion collective pour dresser le bilan collectif de l'activité réalisée en groupes. Dans cette phase la difficulté à différencier les deux modèles persiste : quel que soit le registre sémiotique mobilisé, l'enseignant et les



élèves introduisent des éléments portant à confusion sur le modèle en cours de discussion. Ainsi, lorsque l'enseignant réalise le dessin représentant des lumières colorées (Figure 76), il utilise de la couleur matière (feutres pour tableau blanc), ce qui légitime le recours au modèle des arts plastiques.



Figure 76: le dessin de l'enseignant pour représenter les lumières colorées rouge, verte et bleue

L'enseignant accompagne ce bilan sous forme de dessin au tableau et d'un discours (registre sémiotique langue naturelle, voir ci-dessous). Les objets matériels (les cercles) représentant les lumières colorées sont qualifiés avec les noms des couleurs (bleu, rouge, vert). Ainsi, **quel que soit le registre sémiotique, il existe une ambiguïté du référent au niveau des objets et événements (objet matériel ou lumière), se répercutant sur le modèle (synthèse soustractive ou additive) à mobiliser.**

*Enseignant : « on va faire trois petits cercles un cercle bleu un cercle rouge et un cercle vert (...) il s'agit de lumières colorées rouge verte et bleue »*

Au cours de ce bilan l'enseignant va systématiquement faire référence à un mélange des deux modèles. Il va par exemple mentionner l'addition de lumières (du fait de l'expression consacrée « synthèse additive ») alors que pour les lumières couleurs on devrait parler de superposition (dans la langue courante, cette addition correspond plus au mélange des couleurs-matières).

Pour analyser les modèles sous-jacents à ce bilan oral en langue naturelle, j'ai associé les termes ou expressions employés à l'un ou l'autre des modèles (additif ou soustractif) et j'ai précisé les formulations prêtant à confusion. A titre d'exemple, dans l'extrait ci-dessous, j'ai adopté les codes suivants : souligné = référence au modèle « couleur matière » ; **gras** = référence au modèle « couleur-lumière », *italique* = référence au nom de la couleur uniquement ou termes prêtant à confusion entre les deux modèles.

*Professeur : on a dit lorsqu'on additionnait **la lumière colorée bleue** et la **lumière colorée verte** quand on additionnait **la lumière colorée bleue** et la **lumière colorée verte** on obtenait une euh un bleu qui s'appelait le bleu*

*Elève 2 : cyan*

*Professeur : cyan alors on va marquer ici cyan // quand on additionne de **la lumière rouge** et de **la lumière verte** on obtient*

*Elève 1 : du jaune*

*Professeur : **de la lumière colorée jaune** / alors du jaune je n'ai pas de stylo jaune / alors là on va donc écrire jaune j / lorsqu'on **superpose** de **la lumière colorée rouge** et de **la lumière colorée bleue** on obtient une couleur qui a un nom bien particulier*

*Elève 2 : magenta magenta*

*Professeur : le magenta on va écrire m et lorsqu'on superpose de la lumière colorée bleue de la lumière colorée rouge et de la lumière colorée verte les trois lumières colorées ensemble ça donne du*

*Elève 1 : blanc*

*Professeur : ça donne de la lumière colorée blanche / est-ce que c'est pareil en peinture ↑*

Par la suite, l'enseignant va mettre en parallèle les couleurs issues d'un mélange de peintures et de lumières. Le terme « mélange » est aussi un terme qui prête à confusion « on mélange de la peinture rouge de la peinture bleue et de la peinture verte ». L'enseignant insiste sur la couleur alors obtenue, du marron et termine son intervention par « *alors est-ce que c'est pareil de la peinture et de la lumière* » et conclue « *la peinture c'est de la couleur c'est de la matière* ». Il clôt la discussion sur la différence entre couleur et lumière en précisant que l'on peut toucher de la peinture, mais pas de la lumière.

Cet exemple illustre combien il est difficile de trouver un registre sémiotique parfaitement adapté à la distinction des deux modèles en contradiction dans cette séance. L'artifice trouvé par l'enseignant, soucieux de ne pas mélanger les deux modèles, est d'adjoindre quasi systématique « lumière colorée » à l'adjectif de la couleur afin d'éviter une substantivation matérialisant la couleur de la lumière. Or, il est difficile, sur la durée, de maintenir son attention sur de telles formulations, et l'extrait met en lumière que l'enseignant bascule régulièrement sur des formulations plus courtes, et que la représentation au tableau, nécessaire pour aider les élèves à rédiger un bilan dans leur cahier, l'amène inévitablement à utiliser de la matière pour représenter de la lumière. Ces résultats posent **la question des traces écrites et des registres, qui interfèrent avec le discours et les gestes portés par l'enseignant en apportant des éléments de modèles contradictoires.**

#### 4.4 Le geste pour préparer l'introduction de nouveaux éléments au modèle physique

L'enseignant mobilise une variété de systèmes de signes pour communiquer les contenus des modèles. Si les registres sémiotiques classiques (dessin, schémas, langue naturelle écrite, graphes) sont souvent réfléchis avant la phase d'interaction avec les élèves et sont donc contrôlés par l'enseignant (au sens où ces registres sont envisagés dans l'idée de construire une progression), ce n'est pas nécessairement le cas pour les registres spontanément utilisés dans les interactions verbales et gestuelles. En effet, l'enseignant s'appuie alors, volontairement ou non, sur des registres tels que la langue naturelle (parlée) ou les gestes pour exprimer des contenus de connaissances qui n'ont pas été nécessairement envisagés comme devant être intégrés à ce moment de la leçon.

C'est le cas dans la recherche associée à la séquence d'électrocinétique (Bécu-Robinault & Lund, 2009). Le modèle proposé aux élèves s'apparentait à un *germe de modèle* (Larcher & al., 1990) : les élèves devaient introduire, par le biais de registres sémiotiques comme le dessin, la langue naturelle, de nouvelles propriétés au modèle préalablement exposé. La question adressée aux élèves portait sur l'équivalent de l'interrupteur dans le circuit des camionnettes (première version de l'analogie réalisée en classe avant la modification distinguant les interprétations électrique et énergétique). Après avoir travaillé en groupes, l'enseignante demande à deux groupes de reproduire leur réponse au tableau (Figure 77). Un des groupes suggère un feu rouge, l'autre une barrière de chemin de fer : les camionnettes passent quand la barrière est levée.

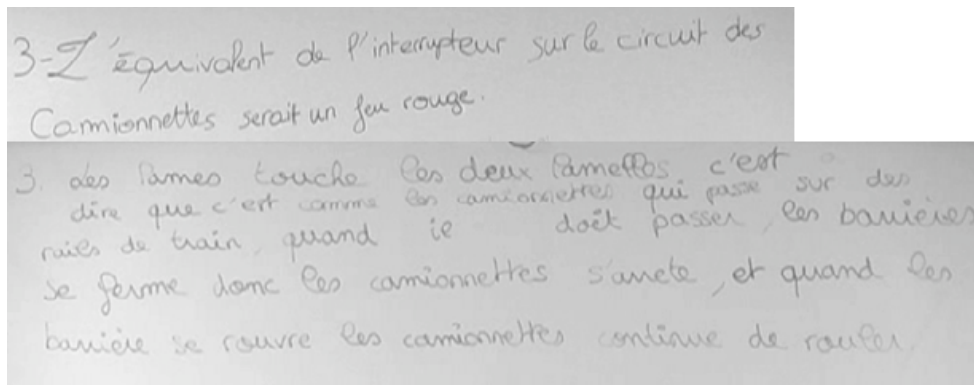


Figure 77: les réponses des élèves inscrites au tableau

L'enseignante insiste alors sur le fait que lorsque le circuit est interrompu, c'est toute la file des camionnettes qui est arrêtée. En ce sens, les réponses des élèves semblent satisfaisantes. Pourtant, elle introduit une autre réponse, qui n'a pas été formulée dans cette classe. Cette réponse, formulée dans une autre classe, avait été discutée au sein du groupe collaboratif DBR comme étant pertinente.

Cette action révèle la complexité du système des tâches de l'enseignant, comportant différents niveaux de buts, orientant l'activité selon diverses temporalités (Rogalski, 2003). L'inscription de l'action sur une temporalité longue permet à l'enseignante d'ajuster sa posture pour aider les élèves à construire leurs rapports aux savoirs. Dans ce cas, elle introduit un nouvel objet, le pont-levis, qu'elle décrit à partir des média « mouvement de corps » et « son de la voix » en utilisant les modes sémiotiques suivants : écriture, parole et geste. Ce nouvel objet et les registres sémiotiques associés sont ajoutés au faisceau sémiotique précédemment élaboré, dans l'idée de faciliter l'introduction ultérieure du concept d'interrupteur qui sera décrit avec le registre sémiotique « schéma ». Ce dernier registre n'a pas encore été introduit, les élèves n'ayant jusqu'alors représenté les circuits électriques que par des dessins.

Les gestes de l'enseignante, concomitants à son discours (Figure 78 et Tableau 12), lorsqu'elle argumente l'avantage de considérer l'interrupteur comme un pont-levis, sont lourds de signification. Effectivement, elle va alors régulièrement alterner deux positions de ses bras : la première (Figure 78, position 1) avec les bras à plat devant elle, avant-bras repliés de façon à avoir les bouts des doigts en contact, la deuxième (Figure 78, position 2) avec les deux avant-bras relevés et parallèles.



**Figure 78 : deux prises de vue de l'enseignante reflétant les positions extrêmes des bras mimant le pont-levis**

**Tableau 12: discours et gestes des élèves et de l'enseignante lors de la reformulation d'une réponse orale**

| Discours                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Gestes                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P : je vous propose une troisième interprétation une troisième façon de voir les choses c'est le pont-levis<br><br>Quand le pont-levis est ouvert donc quand l'interrupteur est ouvert c'est ce qui se passe quand le courant ne passe pas les camionnettes sont arrêtées bien sur ^ quand le pont-levis est fermé qu'est-ce qui se passe ?                      | place ses mains en position 1<br><br>un élève met ses mains dans la même position<br>P met ses avant-bras en position 2<br>l'élève met ses mains dans la position 2<br>position 1 |
| E : le courant y passe pas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                   |
| P : les camionnettes passent le courant peut circuler d'accord pont-levis<br>c'est aussi quelque chose de valable<br>J'aimerais que vous remarquiez une chose donc l'exercice que vous aurez à faire pour la prochaine fois c'est ce serait sur ça vous remarquez que quand les barrières du passage à niveau sont ouvertes qu'est-ce que qu'est-ce qui se passe | position 2 puis position 1<br>position 2<br>position 1<br>position 1<br><br>position 2                                                                                            |
| E : ils passent                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                   |
| E : les camionnettes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                   |
| P : les camionnettes peuvent passer<br><br>lorsque le pont-levis est levé c'est-à-dire lorsque les barrières sont levées                                                                                                                                                                                                                                         | une main levée en position 2 – l'autre main fait mouvements de droite à gauche puis deux mains en position 2<br>position 1 rapide puis 2                                          |
| E : personne passe                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                   |
| P : ça passe pas c'est le contraire<br><br>ok le pont-levis est plus équivalent à l'interrupteur pratiquement que le passage à niveau parce que quand l'interrupteur est ouvert c'est-à-dire quand le pont-levis est levé                                                                                                                                        | Alterne 3 fois la position bras droit en position 1 et bras gauche en position 2 et inversement<br><br>position 2                                                                 |

|                                                                                                                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| alors les camionnettes ne peuvent pas passer et quand le pont-levis est fermé<br>les camionnettes peuvent passer mais le coup du passage à niveau reste juste. | position 1 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

La reformulation par l'enseignante des réponses des élèves peut être interprétée comme poursuivant un double objectif :

1. Il s'agit tout d'abord de faire la différence entre les termes utilisés dans la vie quotidienne et ceux liés au modèle physique de la circulation du courant : dans la vie quotidienne, « ouvert » signifie que l'on laisse passer : une fenêtre ouverte laisse passer l'air, alors qu'en physique, c'est le contraire, un circuit ouvert est un circuit dans lequel le courant ne peut plus circuler. Le parallèle entre les gestes avec le discours indique que sa détermination à introduire les adjectifs « ouvert » et « fermé » avec un sens proche de celui de la physique l'entraîne à les utiliser de manière erronée pour le pont-levis (en réalité, le pont levis est fermé lorsque le pont est levé).
2. Le deuxième objectif est *l'introduction de la schématisation de l'interrupteur*, qu'elle mime avec les bras. Elle s'appuie alors sur un mode gestuel pour asseoir un mode schématisé qu'elle va utiliser dans une séance ultérieure. Dans l'exemple des élèves (le passage à niveau), lorsque la barrière est ouverte, elle est levée et les camionnettes passent dessous, et dans l'exemple du pont-levis, lorsqu'il ouvert, les camionnettes ne passent plus dessus. Ainsi, en changeant de mécanisme, l'enseignante introduit la schématisation ouverte/fermée de l'interrupteur. En reformulant les réponses des élèves, elle crée une distance sémantique (entre la représentation du pont-levis et le schéma de l'interrupteur) qu'elle espère être moins importante que la distance sémantique introduite par le « passage à niveau ». Cette reformulation est un outil facilitant une internalisation par les élèves du processus de fonctionnement de l'interrupteur, en raison des termes choisis par l'enseignante pour décrire son analogue.

A titre de remarque, même si les vidéos prétendaient à l'analyse de l'activité de l'enseignante, la prise de vue panoramique donne accessoirement à voir ce que font certains des élèves. Ainsi, quand l'enseignante mime le fonctionnement du pont-levis (et implicitement l'interrupteur), un élève reproduit les mêmes gestes qu'elle. Ces gestes en écho<sup>92</sup> peuvent être interprétés comme une manifestation d'un début de compréhension du mécanisme de l'interrupteur par cet élève.

Cette étude montre que **les faisceaux sémiotiques évoluent et s'enrichissent grâce aux reformulations polysémiotiques et multimodales**. Ces reformulations révèlent le caractère saillant d'un mode sémiotique. L'enseignante parvient à apprécier la distance sémantique entre les formulations de l'élève et de la physique, appréhendant ainsi les difficultés d'apprentissage. Les actions spontanées de l'enseignante montrent sa capacité à accompagner les élèves dans l'élaboration de faisceaux sémiotiques, impliquant une compréhension de la relation entre les modes sémiotiques. Enfin, **les reformulations polysémiotiques, lorsqu'elles sont judicieusement choisies, aident à la compréhension des notions en réduisant la distance sémantique entre le savoir enseigné et les connaissances quotidiennes**.

---

<sup>92</sup> Je ne fais pas ici référence aux études conduites en psychologie qui indiquent que l'échopraxie est le plus souvent la manifestation d'une déconcentration, d'une fatigue, voire de pathologies neurologiques et psychiatriques. Sur la vidéo, l'élève semble suivre avec attention l'argumentation de l'enseignante.

Dans cet extrait, la reformulation a introduit de nouveaux éléments qui, à ce moment du cours, ne sont pas articulés de manière cohérente. Ce type de reformulation peut être envisagé comme contre-productif pour la compréhension par les élèves. En effet, alors que l'enseignante souhaite donner plus de sens à un objet concret, elle utilise une reformulation qui fait référence à des outils complexes non encore introduits en cours (les symboles et règles de schématisation), et par conséquent non encore articulés aux autres ensembles sémiotiques du faisceau en construction. Cette reformulation induit des difficultés de compréhension supplémentaires chez les élèves.

L'enseignante reformule les productions (verbales ou gestuelles) des élèves ou les documents distribués avec l'idée d'introduire des connaissances nouvelles tout en intégrant des difficultés d'apprentissage. Elle met en place des outils envisagés comme facilitant la compréhension des savoirs en jeu, ou la mise en œuvre d'une interprétation. L'analyse des reformulations montre une anticipation des difficultés des élèves et des concepts à enseigner. L'enseignante utilise, au fil de la leçon, des reformulations estimées efficaces dans le groupe DBR. Elle reformule ainsi des représentations sémiotiques variées (ses cours, les gestes des élèves, leur discours) en s'appuyant sur des connaissances qu'elle a construites hors la classe, tout en se projetant dans un avenir proche. Ces reformulations sont des indicateurs de l'élaboration d'une histoire et de référents communs avec les élèves sur du long terme. C'est son statut institutionnel d'enseignante qui lui permet de se placer dans des temporalités variables. Les élèves quant à eux n'ont d'autres choix que d'essayer de se construire un faisceau sémiotique dans l'instant présent. **Les faisceaux sémiotiques fournissent un outil pour étudier l'évolution des modélisations successives et des différences entre les éléments de modèles mobilisés par les élèves et l'enseignant lors des interactions en classe.**





## - Chapitre 7 -

# Synthèse et discussion sur le cadre épistémo-sémiotique

---

*Dans ce chapitre, je dresse une synthèse des résultats présentés aux chapitres précédents, en les mettant en relation avec ceux obtenus par d'autres recherches, en didactique des sciences, des mathématiques, en sciences cognitives ou en sciences du langage. Cette synthèse soulève de nouvelles questions en lien avec de futurs projets, en articulation avec d'autres cadres théoriques voire d'autres disciplines de recherche. Je conclue ce chapitre en précisant les limites des analyses produites avec le cadre épistémo-sémiotique.*

Cette synthèse et les discussions qui en découlent poursuivent deux objectifs. Il s'agit tout d'abord de rassembler les principaux résultats, issus des différents projets, afin de montrer leur cohérence, l'intérêt de mon cadre, et d'envisager des perspectives de recherches. Il convient par ailleurs de situer mes travaux au regard d'autres recherches. Effectivement, si les deux composantes (modélisation et représentation sémiotique) de mon cadre épistémo-sémiotique ne sont pas originales dans le paysage de la recherche en didactique des sciences, leur combinaison pour l'analyse des pratiques d'étude et d'enseignement dans des projets apparentés à la DBR s'est révélée pertinente, tant pour l'obtention de résultats inédits que pour la conception de séances de classe.

Au fil de la discussion de ces résultats, je mentionnerai quelques travaux qui confortent les miens ou qui ouvrent de nouvelles perspectives. L'idée n'est pas de faire une présentation exhaustive de l'ensemble des travaux en relation avec les modèles dans l'enseignement et l'apprentissage de la physique, les activités de modélisation et les représentations sémiotiques, tâche qui serait absolument impossible tant le nombre de publications au cours de ces vingt dernières années est important. Il s'agit davantage pour moi de faire un point d'étape sur l'ensemble de mes recherches, des résultats obtenus, et de questionner mon cadre épistémo-sémiotique pour la conception d'activité d'enseignement et pour analyser sur ces activités, et d'entrevoir les liens qu'il est possible de tisser avec d'autres approches théoriques.

## 1 Bilan thématique des résultats

Au fil de mes recherches, mon cadre épistémo-sémiotique s'est affiné, les données collectées se sont enrichies, leur traitement a été adapté. Les résultats exposés au chapitre précédent mettent en évidence des facteurs influençant les activités de modélisation et les registres sémiotiques que j'organise en cinq thèmes. Pour chacun de ces thèmes, j'indique le nombre de conclusions auxquelles j'ai abouti afin d'en préciser les poids relatifs :

- thème 1. Les activités de modélisation et de représentation des élèves et les caractéristiques du milieu matériel (6 conclusions) ;
- thème 2. Les activités de modélisation et de représentation des élèves et les caractéristiques des consignes écrites (4 conclusions) ;
- thème 3. Les liens entre registres sémiotiques sur les activités de modélisation (22 conclusions) ;
- thème 4. Les conversions entre représentations statiques et dynamiques (10 conclusions) ;
- thème 5. L'évolution des modélisations des élèves (8 conclusions) ;

C'est le thème en relation avec les hypothèses de mon cadre épistémo-sémiotique, à savoir les liens entre les activités de modélisations et les registres sémiotiques, qui représentent les résultats les plus nombreux. D'autres résultats apparaissent également en force, comme les conversions entre représentations statiques et dynamiques, mais aussi les rapports entre les activités de modélisation, de représentations et le contexte dans lequel ces activités sont analysées : le milieu matériel, les consignes de travail et les autres disciplines. Enfin, si cela n'était pas nécessairement anticipé lors de l'élaboration du cadre épistémo-sémiotique, j'ai mis en évidence des évolutions dans les modélisations successives des élèves. Dans les paragraphes suivants, je détaille ces résultats thématiques, en les mettant en relation avec d'autres recherches. Pour cela, je reformule les résultats (initialement en gras dans mon texte dans le chapitre précédent) volontairement de manière plus générale, pour que leur formulation hors contexte reste explicite. Je les discute ensuite au regard des perspectives ouvertes et des résultats soit obtenus au cours d'autres recherches que j'ai menées, soit issus d'autres recherches publiées en didactique des sciences ou dans des disciplines connexes.

## 1.1 Les activités de modélisation et de représentation des élèves et les caractéristiques du milieu matériel

Je reprends ci-dessous les résultats que j'associe à ce thème, et j'indique entre parenthèses les paragraphes et numéros de pages du chapitre 6, au cours desquels les contextes des recherches et les analyses ont été décrits plus précisément.

1. Les activités relatives à la manipulation des objets et à la prise de mesures sont celles qui incitent les élèves à utiliser le plus grand nombre de niveaux de modélisation et à établir le plus de relations entre ces niveaux (3.1.2, p. 135).
2. Lorsqu'ils produisent une représentation sémiotique du matériel, les élèves ne font figurer que les caractéristiques perceptibles. De ce fait, les caractéristiques non perceptibles ne pourront pas être conceptualisées dans les termes du modèle (3.2.2, p. 147).
3. L'affordance du matériel contraint les élèves dans leurs actions et donc influence son interprétation dans les termes du modèle (3.2.2, p. 147).
4. Une fois manipulés et discutés au sein d'une séance, les objets étudiés seront mis en relation avec les connaissances scientifiques du modèle en cours d'étude dans la séquence (3.2.2, p. 147).
5. Les objets mis à disposition sont des représentations externes, porteuses de significations particulières, que les élèves catégorisent sur la base des phénomènes relatifs à un modèle donné (3.2.2, p. 147).
6. Le choix d'un registre sémiotique peut induire l'élimination des caractéristiques des objets et événements étudiés, même si celles-ci sont par ailleurs discutées comme pertinentes (3.3, p. 153).

En tout premier lieu, ces résultats confortent les hypothèses sur l'importance de la phase de manipulation pour l'enseignement et l'étude des sciences, exposées au cours du chapitre 3. Coquidé (1998) considère le mode de familiarisation pratique comme correspondant plus particulièrement « à l'initiation scientifique du jeune enfant ou à l'abord d'un nouveau sujet d'étude » (Ibid., p. 113). Il s'avère toutefois que la découverte des objets de la situation expérimentale s'est souvent avérée nécessaire, même pour des élèves au niveau du lycée ayant déjà des connaissances sur le sujet traité. En effet, si ni les concepts, ni les éléments matériels n'étaient réellement nouveaux pour les élèves, c'est leur mise en relation qui était à l'étude et qui faisait donc nouveauté : les caractéristiques saillantes à prendre en considération dépendent aussi des objectifs d'enseignement. Dans ce cas, les élèves ne manipulent pas seulement pour voir, l'expérimentation étant contrainte par les consignes, mais pour construire du sens à leurs actions sur les objets à disposition, sur la base de leurs connaissances préalables. Cette phase de manipulation ne restreint pas les élèves au seul niveau des objets et des événements. Dans les situations étudiées, les objets, les événements à étudier avaient été choisis (par l'enseignant) pour être mis en relation avec des éléments conceptuels en référence au niveau du modèle physique. Les élèves projettent spontanément des éléments du modèle qu'ils estiment être pertinents pour l'interprétation ou l'explication. Cette pertinence est parfois discutable, par exemple dans le cas des grandeurs électriques pour l'interprétation dans les termes d'une chaîne énergétique, ou dans le cas des mélanges de couleurs pour prévoir les superpositions de lumières colorées. Les relations entre les niveaux de modélisation établies à ce moment de la séance ne sont pas explicitement requises par l'enseignant. Elles donnent toutefois à l'élève l'occasion de projeter dans la situation des connaissances (naïves ou scientifiques) et donc d'établir des liens entre les connaissances à disposition, les connaissances à construire et les caractéristiques saillantes des objets à manipuler.

Mes résultats indiquent par ailleurs que la manipulation des objets est contrainte par les registres sémiotiques présents dans les consignes fournies aux élèves ou requis dans les comptes rendus. Ainsi, l'élaboration d'un protocole expérimental précisant les branchements (avec un schéma électrique) incite les élèves à s'appuyer sur le modèle de l'électrocinétique. Mobiliser une représentation sémiotique commune à différentes disciplines tend à légitimer le recours à des connaissances issues d'une autre discipline que la physique lors de la description des objets. Les dessins influencent les manipulations ultérieures. Ces résultats révèlent que la signification des objets et événements de la situation expérimentale dépend à la fois des modèles en cours d'enseignement (ou précédemment enseignés), mais aussi des représentations sémiotiques fournies. Les notions de milieu et de contrat didactiques sont intimement imbriquées (Amade-Escot & Venturini, 2009). Mon cadre fournit des outils précisant les éléments du milieu déterminant les pratiques d'étude et donne à voir des effets de contrat liés à la modélisation et aux représentations sémiotiques. Ces résultats constituent un élément de réponse à une contrainte sur la construction d'un milieu pour l'étude « *il faut que leurs pratiques [celles des enseignants] amènent les élèves à rencontrer les savoirs enseignés pour les étudier et les produire hic et nunc* » (Mercier & al., 2002, p. 11). Ces pratiques doivent donc inclure les aspects épistémico-sémiotiques des situations d'enseignement.

Pour la conception des séances d'enseignement, il est donc important de choisir du matériel dont les caractéristiques perceptibles sont celles qui seront effectivement discutées du point de vue du modèle. Il ne s'agit pas de tomber dans les travers de la monstration (Johsua & Dupin, 1993) mais d'éviter un sentiment d'arbitraire lorsque l'on interprète, explique le fonctionnement des objets (Gaidioz & Tiberghien, 2003). Au-delà des caractéristiques techniques des objets (par exemple dans la situation-problème en électricité proposée par Robardet, 2001), ce sont les caractéristiques perceptibles, qualitatives des objets qu'il convient d'analyser *a priori* pour éviter de piéger les élèves en leur fournissant des objets dont les caractéristiques saillantes ne seront pas celles étudiées. Ces résultats sont

en adéquation avec la première des conditions établies par Morge et Doly (2013) pour « *favoriser l'enseignement de la modélisation de telle sorte que les élèves questionnent la différence entre modèle et réalité : l'objet modélisé doit être directement perceptible, l'objet doit pouvoir être modélisé de différentes manières, l'objet et son modèle ne doivent pas être dans un rapport descriptif* » (Ibid, p. 14). Ces résultats vont également dans le sens de ceux sur l'affordance. Les représentations externes orientent et contraignent la manière dont les élèves perçoivent leur environnement. Cette position est proche de celle de Clément (2009) pour qui la notion de représentation externe est proche de celle d'affordance de Gibson : « *les représentations externes sont dans l'environnement, comme les symboles physiques, les objets, les dimensions des objets et les règles externes, les contraintes, les relations qui sont inscrites dans les configurations physiques des situations* »<sup>93</sup>. Ainsi, si les objets et événements et leur modèle ne doivent pas être confondus, ils doivent partager des caractéristiques perceptibles suffisamment proches pour que des relations puissent être établies entre les objets, les événements et la représentation sémiotique utilisée dans le modèle mobilisé.

## 1.2 Les activités de modélisation et de représentation des élèves et les caractéristiques des consignes de l'enseignant

Je reprends ci-dessous les résultats sur les activités de modélisation et de représentation des élèves en lien avec les consignes fournies par l'enseignant. Les consignes désignées dans cette thématique correspondent aux instructions écrites, issues des projets DBR. Entre parenthèses, je précise les paragraphes du chapitre 6 dont ces résultats sont extraits.

1. La référence au niveau de la mesure (en vue de la discussion des valeurs mesurées) est assujettie aux instructions impliquant la manipulation des objets matériels (3.1.2, p. 135).
2. Les registres sémiotiques figurant dans la consigne incitent les élèves à prendre appui sur les modèles associés à ces registres pour mener des actions sur les objets (3.1.2, p. 135).
3. Lorsque le registre sémiotique dans la consigne ne mentionne pas une caractéristique de la situation expérimentale, cette caractéristique ne sera pas utilisée lors des manipulations (3.1.2, p. 135).
4. Plus les consignes s'appuient sur une variété de niveaux de modélisation, plus les élèves mobiliseront et articuleront cette variété de niveaux aux cours de leurs interactions (3.2.1, p. 144).

Tous les résultats de ce thème sont issus du projet « énergie », ce qui ne signifie pas que les consignes au collège n'ont pas d'influence sur les activités de modélisation et de représentation des élèves. Du fait de mes objectifs de recherche dans les projets collège, je n'avais pas alors porté d'attention spécifique sur les consignes écrites : c'est davantage les activités des élèves au cours de leurs interactions, éventuellement en réponse aux reformulations orales et gestuelles de l'enseignant, que j'ai étudiées. Le bilan que je fais dans cette note m'incite à interroger ces consignes à d'autres niveaux d'enseignement, au regard des informations qu'elles contiennent du point de vue des modèles, et des supports et modes sémiotiques portant ces informations.

Les consignes écrites pilotent les savoirs et les éléments de la situation expérimentale qui seront étudiés par les élèves. Cette influence forte des consignes sur les activités des élèves questionne au regard d'autres travaux : « *par souci de faciliter leur réussite et de préserver leur image de soi, on leur propose des tâches simplifiées à l'excès, morcelées et ne faisant appel qu'à des compétences cognitives « de bas niveau » [...] et à des situations*

---

<sup>93</sup> Texte en ligne, pas de numéro de page disponible.

*fermées, dans lesquelles l'activité des élèves est pour l'essentiel déterminée et contrôlée de l'extérieur, par les procédures et les consignes et/ou par l'enseignant* » (Bautier & Goigoux, 2004, p. 97). Dans mes recherches, les séances d'enseignement prenaient appui sur des activités de modélisation, essentielles à la compréhension du fonctionnement de la physique. En ce sens les situations analysées ne sont pas assimilables à des tâches de bas niveau. Sans être directive sur les actions à mener, les raisonnements à mettre en œuvre ou les résultats à obtenir, il semble toutefois nécessaire que les consignes adressées aux élèves légitiment le recours aux différents niveaux de modélisation pour que les élèves s'en emparent, et les articulent. Cela est d'autant plus crucial que les implicites dans les consignes adressées aux élèves sont discriminants socialement (Bautier & Goigoux, 2004). A travers ces consignes écrites, il faut donc suggérer explicitement le niveau de modélisation adapté pour fournir une réponse conforme aux attentes de l'enseignant, ou au fonctionnement de la physique.

Mes recherches autour du rôle de la consigne se sont appuyées sur les instructions écrites uniquement. Ce focus tient aux données collectées lors du projet énergie (seuls les élèves étaient filmés) et à l'orientation de mes recherches, dirigée, à ce moment de ma carrière, sur le processus d'étude uniquement. L'élargissement de mes centres d'intérêts vers les pratiques d'enseignement, associé aux données collectées permettant l'analyse des interactions didactiques, m'incite aujourd'hui à envisager d'autres formes de consignes, qui apparaissent lors de l'interaction, comme les consignes orales et gestuelles qui sont l'une des manifestations des discours de consigne (Filliettaz, 2009). Ces consignes viennent compléter, enrichir les consignes écrites : elles ne véhiculent pas des informations identiques. *« La consigne écrite répond à un principe de condensation et la consigne orale plutôt à un principe d'expansion »* (Rivière, 2009, p. 448). Cela ne signifie pas qu'il faille tenir compte de tous les contenus propositionnels de l'enseignant, car tous ces contenus ne sont pas assimilables à des consignes. Ces dernières peuvent être définies sur la base de propriétés linguistiques : *« dans tous les cas, il s'agira de faire-faire quelque chose à quelqu'un, de l'y inciter plus ou moins fortement, de lui garantir la vérité des informations fournies, et autre aspect du contrat implicite qui lie les interactants, de lui garantir que s'il se conforme aux consignes-instructions, s'il respecte les procédures indiquées, il parviendra au but visé »* (Adam, 2001a, p. 26). Les consignes entretiennent également des liens étroits avec l'action, ce qui conduit Adam (2001b) à les catégoriser comme discours d'incitation à l'action.

Ainsi, dans les séances que j'ai analysées, outre les conséquences des instructions écrites sur les activités de modélisation, la consigne joue plusieurs rôles pour les élèves :

- Elle aide à la prise en charge des connaissances et compétences appropriées : sur la modélisation, sur les éléments du champ expérimental à étudier, ou bien sur la démarche à suivre.
- Elle introduit explicitement, voire légitime, le recours à certaines connaissances : par exemple les grandeurs par le biais des mesures à réaliser, les connaissances de la vie quotidienne *via* l'analogie introduite...
- Plus généralement, elle donne une structure de fonctionnement à la classe, aidant l'enseignant à s'assurer de l'avancement de tous les élèves.

Au cours de la séance, l'enseignant interagit avec les élèves, prélève des informations sur les productions réalisées, les difficultés. Il en résulte de nouvelles consignes, que je qualifie de consignes renégociées : en effet, sauf exception (Bécu-Robinault, 2008), ces consignes données à l'oral ne sont pas anticipées avant le cours, elles émergent spontanément de l'interaction en temps réel entre l'enseignant et les différents groupes d'élèves. Ces consignes peuvent être destinées à la classe, ou à un groupe d'élève particulier, en fonction des productions de ce groupe et des attentes de l'enseignant. Elles englobent les différentes ressources sémiotiques à disposition qui se complètent (Rivière, 2009). Ainsi,



même lorsque le texte des activités d'une séance est construit, à l'image des résultats obtenus par Filliettaz (2009) en formation professionnelle, « *la consigne se déploie progressivement et s'énonce selon une logique séquentielle étroitement imbriquée dans la dynamique d'accomplissement de l'activité* » (Ibid., p. 115).

Ces premiers résultats m'incitent désormais à questionner la manière dont la dynamique des discours de consigne prend en charge les niveaux de modélisation à travers les registres sémiotiques associés. D'autres questions se posent en parallèle : quelles sont, en termes de modélisation, de représentations, les caractéristiques des productions des élèves qui vont entraîner l'enseignant à renégocier la consigne ? Existe-t-il des critères pour élaborer des consignes aidant les élèves à articuler les niveaux de modélisation ? Ces perspectives de recherche, associées aux interrogations sur les formes des consignes en fonction du niveau d'enseignement, seront développées au chapitre 8.

### 1.3 L'articulation entre registres sémiotiques et activités de modélisation

Les résultats sur l'articulation entre registres sémiotiques et activités de modélisation sont les plus nombreux à travers les recherches présentées. Ces résultats portent sur des thématiques variées : aides à la conception de séances, difficultés des élèves, influence des registres sémiotiques sur les niveaux de modélisation... J'en fournis ci-dessous une liste organisée en fonction de thématiques communes, en précisant les paragraphes dans lesquels ils sont développés.

#### 1.3.1 Les aides à la conception d'activités pour les élèves

La première des catégories regroupe les aides à l'articulation des niveaux de modélisation.

1. Le registre sémiotique « schéma » aide à l'articulation entre le niveau du modèle physique et le niveau des objets et événements (3.1.2, p. 135).
2. Le registre sémiotique « tableau » tend à figer les mesures effectuées ce qui facilite leur conversion dans d'autres registres sémiotiques (3.2.1, p. 144).
3. Le registre sémiotique « schéma » favorise des fusions entre niveaux de modélisation (3.2.3, p. 150).
4. Les contenus des registres sémiotiques peuvent aider les élèves à établir des relations entre le niveau des objets et événements et le niveau modèle ou les relations internes au niveau des objets et événements (3.3, p. 153).

Ces résultats doivent être lus comme des aides à la conception d'activité, et non des normes spécifiant les caractéristiques auxquelles toute activité devrait se conformer. En raison du contexte de recherche (des activités conçues collaborativement au sein de projets DBR), ces résultats justifient *a posteriori* le choix de certaines représentations sémiotiques ou permettent d'anticiper les relations entre niveaux de modélisation que les élèves établiront en fonction des registres sémiotiques proposés. Cette catégorie de résultats contribue à alimenter différentes étapes du processus de Design-Based Research : lors de l'élaboration des séquences, il est possible de s'appuyer sur ces pistes pour concevoir des tâches aux élèves qui contribuent à la modélisation ; au cours de la recherche, il conviendrait d'étudier si ces différentes pistes constituent systématiquement une aide, en fonction d'éléments de contexte qu'il s'agira d'explicitier. Des études ciblées sur ces différents points sont envisageables dans le cas de mémoires de master recherche par exemple.

### 1.3.2 Difficultés associées à l'articulation des niveaux de modélisation et des registres sémiotiques

D'autres résultats pointent des activités au cours desquelles les élèves rencontrent des difficultés concernant la signification de registres spécifiques en relation avec les modèles. Je reprends ici les résultats mettant en lumière les difficultés soulevées par les registres sémiotiques des graphes et des tableaux.

5. Le registre sémiotique « graphe » est plus spontanément associé à des connaissances mathématiques qu'à des connaissances physiques, ce qui influence la signification des grandeurs représentées sur le graphe (3.2.1, p. 144).
6. Les élèves tendent à construire et exploiter les graphes en se référant à des connaissances du modèle mathématique uniquement (3.4.1, p. 156).
7. Sur le graphe, les élèves ont des difficultés à associer les valeurs sous forme de nombres à des valeurs mesurées de grandeurs physiques (3.4.1, p. 156).
8. Le registre des graphes est un frein à l'interprétation des données quantitatives au niveau du modèle physique (3.4.1, p. 156).
9. Les niveaux du modèle mathématique, de la mesure et surtout des objets/événements sont peu mis en relation lors de l'élaboration et l'exploitation des graphes (3.4.1, p. 156).
10. Lorsqu'ils traitent des informations quantitatives sur les grandeurs, les élèves marquent une préférence pour le modèle mathématique au détriment du modèle physique dont ces grandeurs relèvent (3.4.1, p. 156).
11. Les différences de symboles utilisés dans les registres des écritures symboliques en mathématique et en physique constituent un obstacle à l'interprétation du registre « graphe » au niveau du modèle physique (3.4.1, p. 156).
12. Les activités ayant pour objectif d'associer un registre sémiotique à un modèle physique s'avèrent plus complexes pour les élèves si les règles de manipulation de ce registre en lien avec le modèle ne sont pas explicitées (3.4.2, p. 163).

La signification des graphes est une difficulté récurrente. Il s'avère que les unités significantes dans la représentation sémiotique « graphe » sont interprétées sur la base de connaissances relevant davantage du modèle mathématique. Ces unités significantes dans les graphes sont souvent perçues par les enseignants comme des représentations pour lesquelles les élèves disposent déjà de connaissances mathématiques, supposées aisément transférables à la physique (Planinic & al., 2013). Or, la recherche montre que *« even though students possess certain resources, they do not activate them because different contexts of problems lead them to choose different solving strategies. Had this study been limited to only kinematics graphs, we might have concluded that students have very limited knowledge on graphs. However, in many instances this would not have been true, since students have often displayed their ability to extract relevant information from graphs in mathematics, and sometimes also in other contexts, but did not use that ability on physics problems »* (Ibid., p. 8). Pour ces auteurs, les difficultés des élèves ne sont donc pas dues à un manque de connaissances sur l'exploitation des graphes en mathématiques. Par ailleurs, Duval (1995) mentionne que, déjà en mathématiques, la construction d'un graphe sur la base d'un tableau de valeurs est une conversion complexe : les unités significantes dans les tableaux de valeurs ne sont pas identiques aux unités significantes dans un graphe : le passage de l'un à l'autre implique de donner changer la signification des coordonnées réelles des points, unités discrètes du tableau, pour les intégrer à une représentation générale dans laquelle des points sont fictifs et intégrés à une représentation continue. Mes recherches montrent que les modèles utilisés par les élèves lors de la conversion du registre sémiotique tableau vers le registre graphe posent difficultés. Effectivement le tableau est étroitement associé au niveau de la mesure. Les données

sélectionnées par les élèves dans les tableaux pour construire leur graphe sont des nombres. Le graphe, pour être interprété, requiert des outils provenant d'un autre modèle, à savoir le modèle mathématique. Le changement de registre est donc associé à un changement de niveau de modélisation. Ces résultats vont dans le sens de ceux de Malafosse et al. (2000): « *Les élèves traitent donc les données numériques expérimentales comme des nombres purs. Ils se placent ainsi dans le cadre des mathématiques pour établir des relations numériques* » (Ibid., p. 58). Prenant appui sur les registres sémiotiques et les cadres de rationalité de Douady (1984), la conclusion de Malafosse et al. (2000) met « *en évidence l'obstacle de non continuité du registre graphique cartésien et du registre algébrique ainsi que l'obstacle du changement de règles de raisonnement entre les deux cadres de rationalité* » (Malafosse & al., 2000). Leur interprétation des difficultés des élèves, à l'instar de la mienne, porte sur la différence de signification des éléments traités (les valeurs dans le tableau par exemple) en mathématiques et en physique et le passage d'un registre à un autre. Dans mon approche, chaque registre faisant appel à un modèle différent, la difficulté liée à la conversion de registre se combine à l'articulation de deux niveaux de modélisation. Ces deux difficultés combinées entravent considérablement la construction du sens des mesures en relation avec les grandeurs physiques. Mon cadre épistémologique-sémiotique fournit ici l'une des raisons aux difficultés récurrentes rencontrées par les élèves à connecter les graphes aux situations physiques (Forrest & Whalen, 2012).

### 1.3.3 Influence des registres sémiotiques sur les niveaux de modélisation

Deux de mes résultats mettent en évidence l'influence du choix d'un registre sémiotique sur la modélisation construite par les élèves. Le premier met en cause le registre sémiotique « dessin » au regard de la modélisation de la situation qu'il donne à entrevoir et le deuxième est lié à la nécessité, dans l'enseignement, de conserver une trace écrite de l'activité :

13. Le registre sémiotique « dessin », lorsqu'il est produit par les élèves, ne suffit pas à les aider à construire du sens aux objets manipulés, en particulier quand le dessin n'est pas conforme au savoir scolaire (3.1.3, p. 141).
14. les registres sémiotiques et la nécessité de leur conversion en une trace écrite pérenne pour les élèves influencent les éléments à intégrer au modèle (3.3, p. 153).

Le premier de ces résultats interpelle car le choix du registre sémiotique « dessin » devait au contraire aider les élèves à construire une première modélisation de la situation, soit en dessinant l'expérience prévue, soit en dessinant l'expérience réalisée. Contrairement au schéma, qui véhicule de nombreuses connaissances en relation avec le modèle physique, le registre du dessin est davantage associé aux connaissances préalables des élèves. Ainsi, il semblait opportun de s'appuyer sur ces connaissances naïves pour développer ensuite des représentations et connaissances scientifiques : « *Drawing constitutes a well-developed prior competence. Within drawing, using space to represent spatial relations constitutes a specific and powerful set of strategies and heuristics. A second scheme of representation is temporal sequence: using a series of icons to tell a story unfolding over time* » (DiSessa, 2004, p. 327). Mes résultats montrent que dessiner n'est effectivement pas neutre : lorsque les élèves dessinent, ils projettent sur le dessin leurs connaissances quotidiennes, qui constituent des modèles explicatifs naïfs. C'est d'ailleurs ce qui a incité les didacticiens à faire produire des dessins aux élèves afin d'étudier leurs conceptions (Orange & Orange-Ravachol, 2013). Cette emprise des connaissances préalables sur les dessins produits conforte les résultats de précédentes recherches : Bresson (1987) avait déjà montré que le choix d'un registre sémiotique pour représenter un contenu cognitif a pour conséquence de ne sélectionner que certains éléments significatifs du contenu, en raison des possibilités et des contraintes inhérentes à ce registre. Une représentation sémiotique quelle qu'elle soit ne peut représenter l'intégralité d'un contenu : « *the sign is always a partial representation of the object represented, since it represents the interest of the sign-maker at the point*

*of making the sign* » (Kress & al., 2001, p. 6). Pour donner à voir la complexité d'un contenu, cette représentation doit être complétée par d'autres, impliquant des conversions du contenu représenté vers d'autres registres sémiotiques. Toutefois, dans des contextes tels que ceux de mes projets (début du collège, premières activités en électrocinétique), les élèves n'ont pas toujours d'autres registres sémiotiques à disposition. Il est donc nécessaire d'aider les élèves à faire évoluer ces dessins vers des représentations sémiotiques en cohérence avec les savoirs enseignés.

Le deuxième résultat de cette catégorie mentionne la nécessité de conserver une trace pérenne (et donc de choisir un registre sémiotique adapté). Il faut donc prendre en considération que ce n'est pas le seul dessin, en début de séquences, qui va produire une modélisation de la situation dans les termes du savoir scolaire. Les gestes, associés au discours lors de la manipulation ont également un rôle dans la modélisation de la situation. Il faut donc veiller à ce que le dessin ne soit pas le seul référent existant pour les élèves lors de leurs futures activités : les éléments non représentés sur ces dessins ne pourraient effectivement pas être convertis et représentés avec les autres registres. Afin que les gestes soient mobilisés, il est souhaitable que la situation expérimentale continue à être accessible, et ce, tant que, par exemple, le schéma (représentation sémiotique du modèle électrocinétique, le dessin (représentation sémiotique de la situation), la description et la manipulation de la situation expérimentale ne constituent pas un faisceau sémiotique cohérent.

#### 1.3.4 A l'origine des difficultés des élèves

La catégorie de résultats présentée ci-dessous présente des aides pour identifier l'origine de certaines difficultés rencontrées par les élèves lors de l'association d'un registre sémiotique à un modèle :

15. Les confusions entre les interprétations des états de la matière aux niveaux microscopiques et macroscopiques, associées à la mobilisation d'un modèle naïf ne dépendent pas du registre sémiotique choisi (3.4.2, p. 163).
16. Les registres sémiotiques ne sont pas toujours associés à un unique niveau de modélisation (4.3, p. 178).
17. La présentation d'un registre sémiotique peut implicitement susciter le choix d'un modèle autre que celui visé par l'enseignant pour l'interprétation des observations (4.3, p. 178).
18. Le registre « écriture symbolique » est étroitement associé au niveau du modèle mathématique (3.4.1, p. 156).
19. Les opérations réalisées sur les valeurs des grandeurs favorisent le recours aux écritures symboliques et en conséquence l'interprétation de ces valeurs au niveau du modèle mathématique (3.4.1, p. 156).
20. Le choix d'enseigner un modèle physique à partir de registres sémiotiques, également sollicités par d'autres modèles, a des répercussions sur les significations que les élèves construisent à ces registres sémiotiques (3.4.2, p. 163).
21. Lorsque des registres sémiotiques sont communs à plusieurs disciplines d'enseignement, ils embarquent des propriétés associées à ces modèles disciplinaires (3.4.2, p. 163).
22. Une représentation sémiotique n'est pas toujours associée à un seul modèle physique ; elle peut renvoyer à un modèle d'une autre discipline (4.3, p. 178).

Ces résultats illustrent le lien fort existant entre les modèles et les registres sémiotiques. Dans certains cas, les registres, comme les écritures symboliques, sont intimement associés à un modèle donné, dans l'exemple de résultat, avec le modèle mathématique. Mais cela peut aussi être un schéma électrique qui incite à interpréter la situation dans les termes d'un modèle électrocinétique. Il convient donc

d'être prudent dans les choix qui sont faits sur les registres sémiotiques présentant les situations expérimentales.

Ce lien fort entre registre sémiotique et modèle induit parfois un paradoxe : ce ne sont pas nécessairement les modèles ou objets au cœur des situations d'enseignement qui sont mis en œuvre par les élèves. Comme je l'ai exposé dans le chapitre 4, lorsque le modèle est présenté en association avec une représentation sémiotique donnée, comme dans le cas du modèle énergétique dans les projets « énergie », le modèle peut être confondu avec cette représentation particulière (De Vries, 2007). Ainsi, quand un modèle a déjà été enseigné avec une représentation sémiotique particulière, lorsque cette représentation est à nouveau exposée dans le cadre d'un autre enseignement, les élèves peuvent être tentés d'utiliser cette représentation en l'associant au premier modèle enseigné. Cela a été le cas pour le schéma de la synthèse additive, confondu avec celui de la synthèse soustractive. Cette référence à un modèle autre que celui visé par l'enseignant est aussi une interprétation de l'utilisation du modèle mathématique pour calculer la pente de la droite, ou des propriétés géométriques des triangles pour expliquer la dilatation de l'eau. Dans ce dernier cas, les unités signifiantes sont interprétées comme des objets qui ne seront pas ceux étudiés dans la situation d'enseignement.

La différenciation de modèles sur la base de représentations sémiotiques spécifiques m'avait incitée à proposer deux modèles pour interpréter le fonctionnement d'un circuit électrique simple : l'un sous forme de chaîne pour interpréter l'usure de la pile sur la base des transferts d'énergie, l'autre sous forme d'une boucle pour interpréter la nécessité de fermer le circuit pour que l'électricité circule. Ce choix a conduit à initier l'enseignement de l'électricité avec deux modèles complémentaires au sens de Walliser (1977). Ce choix donne également à travailler la notion de modèle comme Morge et Doly (2013) le suggèrent, en rompant avec les relations biunivoques entre modèle et réalité. Dans leur article, ces derniers proposent, à partir d'une situation relativement complexe, de modéliser la pile selon différents modèles, selon les fonctions des objets à étudier : la pile comme générateur de tension, comme source de lumière, comme objet de masse m... La situation qu'ils exposent a comme objectif d'aider les élèves à distinguer le modèle et la réalité. Dans les séances d'enseignement élaborées au sein des projets « collège », c'est la même situation expérimentale qui est interrogée selon deux modèles, et les élèves ont à leur disposition deux représentations, chacune étant associée à un modèle spécifique. Ainsi, tout en m'inscrivant dans une perspective proche de Morge et Doly (2013), je distingue les modèles à travers les registres sémiotiques associés. Des questions subsistent toutefois sur le contexte d'introduction de ces deux modèles mettant en jeu pour le premier des concepts liés au domaine de l'électricité, et pour le deuxième des concepts liés au domaine de l'énergie. En effet, de même que les représentations enseignées en mathématiques embarquent des propriétés liées à cette discipline, n'est-il pas probable que le modèle énergétique introduit lors de l'enseignement de l'électricité embarquent des significations de ce domaine ? Afin de répondre à cette question une étude des propriétés mises en œuvre par les élèves lorsqu'ils utilisent ce modèle sur du plus long terme serait à envisager<sup>94</sup>.

Les résultats que j'ai obtenus sont dans la lignée de nombreuses recherches pointant l'importance des multiples représentations des modèles enseignés (par exemple Rappoport, & Ashkenazi, 2008 ; le numéro 48 de la revue ASTER en 2009 dédié aux représentations graphiques dans l'enseignement scientifique et technologique). Ces travaux montrent notamment que les élèves ont des difficultés à

---

<sup>94</sup> Cette recherche serait facilitée car les enseignants ayant participé aux projets « énergie » sont toujours impliqués dans des projets que j'anime actuellement. A peu de choses près, les séances sont similaires à celles élaborées collectivement au sein des projets « collège ». Il serait alors envisageable de proposer une recherche sur une sélection d'élèves de troisième (ceux qui auraient suivi nos séances en cinquième), sur le thème de l'énergie.

mettre en relation leur compréhension des phénomènes et leur représentation scientifique « *in typical physical science courses from middle school through university, students have difficulty coordinating their understanding of scientific phenomena and external representations of those phenomena* » (Stieff, 2011, p. 1137). En parallèle, des travaux sur les novices et les experts ont montré que les experts s'appuient plus facilement sur une variété de représentations pour résoudre les problèmes de physiques. « *It has even been suggested that competency with several representations of a concept is a prerequisite for expertlike understanding* » (Kohl & al., 2007). Cela incite à proposer des stratégies d'enseignement fondées sur la manipulation de représentations sémiotiques multiples (Rosengrant & al., 2009 ; Fredlund & al., 2012 ; Linder, 2013). L'apprentissage est alors envisagé comme la capacité à passer d'une représentation sémiotique à l'autre : « *from a disciplinary discourse perspective, learning in a science discipline should be seen in terms of achieving fluency in a critical constellation of modes of representation* » (Linder, 2013, p. 43). Mes recherches révèlent des difficultés récurrentes des élèves à mettre en relation leur compréhension des phénomènes et les représentations sémiotiques associées au modèle physique. Par ailleurs, j'ai aussi pointé les dangers à enseigner un modèle physique sur la seule base des représentations. Aussi, il me semble souhaitable, avant de manipuler une multiplicité de représentations, de comprendre le rôle que joue une représentation sémiotique usuelle (scolaire ou scientifique selon les cas) au sein d'un modèle donné, de manière à ce que les élèves ne manipulent pas seulement des représentations, mais des unités sémiotiques ayant une signification précise dans un modèle donné. Selon les situations d'enseignement, la manipulation d'une représentation usuelle induit généralement des conversions avec d'autres registres sémiotiques : la langue naturelle lorsque les élèves doivent communiquer entre eux, ou avec l'enseignant, le dessin en fonction de ce qui a été proposé au préalable... D'autres conversions de registres sont ensuite suscitées par les tâches proposées pour donner à discuter le sens construit à la représentation sémiotique. Je reviendrai au paragraphe 2.1 de ce même chapitre, p. 204, sur les hypothèses liées à mon cadre épistémo-sémiotique.

#### 1.4 Les conversions entre représentations sémiotiques statiques et dynamiques

Une autre catégorie de résultats apparaît massivement au fil de mes recherches, à savoir les conversions entre représentations sémiotiques statiques (désignées par les registres sémiotiques) et dynamiques (notamment le mode sémiotique geste étudié conjointement à la parole). Ces résultats ont été rendus possibles grâce à l'analyse des vidéos des élèves et des enseignants. Lors de ces analyses, tous les gestes n'ont pas été analysés. En effet, il ne s'agit pas de confondre modalité perceptive et registre sémiotique, ce qui reviendrait à faire abstraction du processus de sémiotisation (Peraya & Meunier, 1999). Dans mes recherches, j'ai sélectionné les gestes porteurs d'une signification au regard des modèles discutés. Le volume conséquent de ces résultats est lié à la nouveauté de ce type d'études dans le champ de la recherche en didactique. Au moment de la rédaction de cette note de synthèse, une recherche sur le terme de « geste » dans la revue RDST indique qu'il est surtout question de « geste professionnel », de « geste d'enseignement », mais que le geste n'est pas habituellement analysé comme à un registre sémiotique véhiculant des éléments de savoir. De manière générale, les recherches sur le geste ne sont pas encore très nombreuses dans le champ de l'éducation scientifique (Roth, 2002) : « *there exists very little educational research concerned with the role of gestures in learning and teaching, particularly in the subject areas that have been characterized as dealing with abstract matters such as science and mathematics* » (Ibid., p. 365). Ce constat est aussi celui dressé par Alibali et Nathan (2011). Les recherches autour du geste dans les situations d'enseignement et d'apprentissage sont actuellement plus développées dans le champ de l'éducation aux mathématiques, comme l'atteste le numéro spécial de la revue *Educational Studies in Mathematics* en 2009. Par conséquent, les travaux d'Arzarello et al. (2009) et de Radford (2009) ont fait largement contribué à développer mon approche des gestes dans les



pratiques d'études et d'enseignement de la physique. Cette intégration des aspects multimodaux se développe actuellement dans l'analyse des situations d'enseignement et d'apprentissage de la physique au niveau international (Givry & Roth, 2006 ; Airey & Linder, 2009 ; Hackling & al., 2013 ; Linder, 2013).

Parmi l'ensemble des gestes possibles, je me suis intéressée aux gestes co-verbaux (Mc Neill, 1992) accompagnant le discours verbal. Le geste a ainsi été analysé, en association la langue naturelle comme un composant d'un faisceau sémiotique (Arzarello & Paola, 2007). Les gestes d'accompagnement du discours sont considérés comme un mode sémiotique car de nombreuses recherches ont montré que *« the gestures produced in these situations can be assigned meanings and, most importantly, independent observers reliably assign the same meaning to the same gesture »* (Goldin-Meadow, 1999, p. 421). Le mime, habituellement qualifié d'emblème car consciemment communicatif (Goldin-Meadow, 1999 ; Tellier, 2008), a également été considéré comme co-verbal car il était réalisé en parallèle et donc en accompagnement à un discours (parfois directif) de l'enseignant. J'indique ci-dessous les résultats sur les gestes en tant que mode sémiotique, en les organisant en trois catégories de résultats.

#### 1.4.1 Difficultés associées au mode sémiotique « geste »

La première catégorie reflète les difficultés que les élèves rencontrent à traiter les informations avec ce mode sémiotique ou à la convertir vers d'autres registres sémiotiques.

1. Les élèves peinent à convertir le registre sémiotique « dessin » en mode sémiotique « geste » (3.1.3, p. 141).
2. Dans les situations d'interactions où des aspects dynamiques sont communiqués, le mode sémiotique « geste » apparaît souvent comme le plus pertinent, mais les gestes sont difficilement traductibles sur papier pour constituer une trace pérenne (3.3, p. 153).

Le premier résultat peut être mis en relation avec les caractéristiques des objets qui ont été représentées par le registre « dessin », comme indiqué au paragraphe précédent. Les élèves n'ayant pas nécessairement sélectionné pour leur dessin toutes les unités significantes, il en découle ensuite une difficulté à manipuler les objets en stricte conformité avec le dessin.

Le deuxième résultat reflète une contrainte d'enseignement : les élèves doivent conserver une trace des activités conduites, le plus souvent par écrit dans un cahier<sup>95</sup>. Si les gestes permettent effectivement de communiquer de manière efficace et spontanée, les élèves peinent à les convertir dans un registre compatible avec les contraintes de la trace écrite. Pour autant, la communication *via* les gestes est d'autant plus importante qu'elle semble être le premier registre sémiotique, avant la langue naturelle, que les élèves parviennent à mobiliser lorsqu'ils étudient : *« In fact, when students talk about concepts they are learning, they often express new knowledge in gestures before they express it in speech »* (Alibali & Nathan, 2011, p. 2). La conversion du geste vers un registre porté par l'écrit sera rendue possible lorsque le faisceau sémiotique intégrant le geste et les autres registres à disposition sera cohérent. Je souhaiterai désormais mettre à l'épreuve l'hypothèse (voir paragraphe 1.3.3 de ce même chapitre) selon laquelle les élèves cessent de manipuler quand le faisceau sémiotique, intégrant le geste, est cohérent avec les savoirs académiques.

---

<sup>95</sup> Dans le projet que j'anime actuellement sur les ruptures et continuité dans l'enseignement des sciences du primaire au collège indique que ces traces écrites dans le cahier n'ont pas le même statut au primaire et au collège.

### 1.4.2 Le geste dans le faisceau sémiotique en construction

La deuxième catégorie de résultat fait état de l'intégration ou des apports du registre sémiotique « geste » au faisceau en cours de construction.

3. Les interactions entre élèves font évoluer les points de vue individuels, tant sur les représentations sémiotiques statiques (dessin, schéma) que dynamiques (gestes) (3.5, p. 169).
4. Le recours à une modalité sémiotique telle que le geste assure à la fois une vision dynamique du modèle et une incarnation des connaissances à mettre en œuvre (4.2, p. 175).
5. Les faisceaux sémiotiques évoluent et s'enrichissent grâce aux reformulations polysémiotiques et multimodales (4.4, p. 183).

Ces résultats indiquent que le geste contribue, au même titre que les autres représentations sémiotiques, à produire du sens et donc à faire évoluer les connaissances des élèves. Cette incarnation des connaissances correspond à ce que Alibali et Nathan (2011) nomment l'*embodiment* « *gestures are often taken as evidence that the body is involved in thinking and speaking about the ideas expressed in those gestures. That is, gestures are taken as evidence that the knowledge itself is embodied* » (Ibid., p. 2). La particularité du geste est de donner à voir par exemple l'évolution des observations, la dynamique des événements qui ne peuvent être traduits uniquement sur la base d'activités langagières. En ce sens, mes recherches s'inscrivent dans la lignée de la sémiotique multimodale élaborée par Kress et van Leeuwen (2001). La pluralité des registres sémiotiques et des modalités de communication (et non un registre ou une modalité spécifique) contribue à l'enrichissement des faisceaux sémiotiques et donc à la compréhension des phénomènes à étudier. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Arzarello et al. (2009) : « *it is the multimodality of the semiotic bundle to guarantee the improvement of students' cognition more than this or that single component of the semiotic bundle* » (Ibid., p. 107). L'apport de mon approche, par rapport à celle d'Arzarello et de ses collègues, réside dans la possibilité d'attribuer des significations aux gestes et aux autres registres sémiotiques produits dans l'interaction, au regard de la variété des modèles à disposition (ceux de la physique ou des autres disciplines d'enseignement).

### 1.4.3 Le geste dans les reformulations multimodales

A l'instar de Kress et al. (2001) j'ai considéré les différents registres sémiotiques dans l'interaction, pour mettre en évidence comment ils contribuent à la construction des savoirs en classe. Les résultats suivants concernent les reformulations multimodales, dans lesquelles les gestes occupent une place centrale.

6. La reformulation de l'enseignant, dans le but d'aider les élèves, reflète la dissymétrie, en termes de niveaux de modélisation et registres sémiotiques entre l'enseignant et les élèves (4.1, p. 173).
7. L'enseignant s'appuie sur les modalités « geste » et « parole » pour aider les élèves à élaborer un faisceau sémiotique intégrant divers niveaux de modélisation (4.2, p. 175).
8. Les relations garantissant l'unité et la cohérence des faisceaux sémiotiques sont assurées par les différents registres sémiotiques mis en œuvre par l'enseignant (4.2, p. 175).
9. La nécessité de produire des traces écrites peut interférer avec le discours et les gestes portés par l'enseignant en apportant des éléments de modèles contradictoires (4.3, p. 178).
10. Les reformulations polysémiotiques peuvent aider la compréhension des notions en réduisant la distance sémantique entre le savoir enseigné et les connaissances quotidiennes (4.4, p. 183).

Ces reformulations multimodales s'apparentent au *semiotic games* mis en évidence par Arzarello et Paola (2007) comme étant des stratégies inconscientes de l'enseignant lors d'interaction avec les élèves pour les faire progresser vers des formes de savoir plus conventionnelles. La définition des reformulations que j'ai retenue dans mes travaux s'inscrit davantage dans la lignée travaux en linguistique et englobe « *l'ensemble des activités langagières par lesquelles le locuteur/énonciateur revient sur des dire antérieurs* » (Rabatel, 2010, p. 10). Une approche des reformulations au sens large, contrairement à l'approche d'Arzarello et Paola (2007), ne me contraint pas à produire des analyses en termes de stratégies, même inconscientes, mises en œuvre par l'enseignant<sup>96</sup>.

Les gestes de l'enseignant au cours des reformulations multimodales s'apparentent dans certains cas au geste professionnel de tissage, défini par Bucheton et Soulé (2009). Le tissage est « *l'activité du maître ou des élèves pour mettre en relation le dehors et le dedans de la classe, la tâche en cours avec celle qui précède ou qui suit, le début avec la fin de la leçon* » (Ibid., p. 33). Ainsi, lorsque l'enseignant mime le fonctionnement d'un interrupteur sur la base de sa représentation symbolique (non encore accessible aux élèves), ce registre sémiotique « geste » serait un geste de tissage, et donc un geste professionnel. Même si les séances suivantes (introduction des schémas électrocinétiques, présentation de la schématisation des faisceaux de lumière) n'ont pas été analysées, il est raisonnable de faire l'hypothèse que ce seront les mêmes gestes qui seront produits, contribuant ainsi à la construction d'un milieu didactique dans la continuité des précédents (Brousseau, 2004 ; Bucheton & Soulé, 2009).

Dans mes recherches, les représentations dynamiques analysées sont essentiellement les gestes et les mouvements du corps. D'autres représentations dynamiques peuvent être mobilisées, notamment à travers les simulations informatiques. C'est dans cette direction que je souhaite orienter mon cadre épistémo-sémiotique, en lien avec un projet de recherche-développement (Tactileo) dans lequel j'anime un groupe collaboratif autour des tables tactiles et des objets tangibles. Cette perspective de recherche sera précisée au chapitre 8.

## 1.5 L'évolution des modèles élaborés par les élèves

Les recherches présentées dans cette note de synthèse ont mis en évidence des évolutions dans les activités de modélisation et les modèles construits par les élèves, en relation avec les registres sémiotiques utilisés. Je présente ci-dessous les résultats concernant ces évolutions, associés aux numéros des paragraphes dans lesquels ces résultats sont détaillés.

1. Pour les élèves, la mesure relève initialement du monde des objets et événements, et elle est peu à peu intégrée au monde des théories et modèles, conformément au point de vue du physicien (3.2.1, p. 144).
2. Les fusions entre niveaux de modélisation peuvent être considérées comme une étape intermédiaire dans la construction de la signification des concepts (3.2.3, p. 150).
3. La fusion entre des termes relevant de deux analogues, favorise une meilleure compréhension du modèle cible (3.2.3, p. 150).
4. Les fusions opérées entre deux niveaux de modélisation ou entre deux modèles, sont une phase transitoire en vue d'une distinction ultérieure de ces niveaux ou modèles en vue de leur articulation (3.2.3, p. 150).

---

<sup>96</sup> La raison que je donnerai volontiers est que je ne suis pas certaine que ces stratégies, ou jeu sémiotique, puissent être enseignés à de futurs enseignants...

5. L'absence de référence explicite au modèle physique lors du traitement des données numériques ne représente pas nécessairement un obstacle à l'établissement d'une relation à intégrer au modèle physique (3.4.1, p. 156).
6. L'enrichissement d'un faisceau sémiotique cohérent est un indicateur que les modélisations des élèves sont en conformité avec le modèle physique (3.5, p. 169).
7. La cohérence d'un faisceau sémiotique construit par les élèves doit être mise à l'épreuve pour évoluer vers la construction d'un modèle scientifique (4.1, p. 173).
8. L'approche en termes de faisceaux sémiotiques permet une étude de l'évolution des modélisations successives et des différences entre les éléments de modèles utilisés par les élèves et l'enseignant (4.4, p. 183).

Le premier résultat interpelle mon cadre épistémo-sémiotique : si la signification donnée par les élèves aux éléments des niveaux de modélisation évolue, alors s'offrent deux possibilités pour mettre en évidence cette évolution : soit j'introduis un niveau relatif à la mesure au monde des théories et modèles, soit je fais évoluer la position des niveaux de modélisation (et en particulier celui de la mesure) en fonction du niveau scolaire. L'évolution des éléments d'un niveau (théorique) vers un autre niveau (empirique) n'est pas sans rappeler l'approche choisie par Martinand (1996) ou Bisault et Berzin (2009), à la différence fondamentale près que je fais évoluer des éléments du monde des objets et événements, les mesures, vers le monde des théories et modèles.

Les trois résultats suivants (numérotés de 2 à 4) présentent des facteurs favorisant (ou du moins qui n'entravent pas pour le troisième) la mise en relation des niveaux de modélisation : ainsi, les fusions entre niveaux, qu'il était possible de pressentir *a priori* comme nuisibles à la distinction et l'articulation des niveaux de modélisation s'apparente davantage à une transition nécessaire pour certains élèves. Ces fusions sont favorisées par les schémas et sont similaires aux interprétations intermédiaires de Tiberghien et Megalakaki (1995). Toutefois, ces fusions ne sont qu'une étape dans la compréhension du fonctionnement de la physique, et, à ce titre, doivent progressivement évoluer vers une distinction des niveaux de modélisation.

Le traitement des données quantitatives doit se faire en mobilisant un niveau de modélisation adapté à ce traitement. Les recherches que j'ai conduites, impliquant ce type de traitement, portaient sur des élèves de lycée, dont la maîtrise des outils mathématiques est évidemment plus importante que les élèves de collège. Il conviendrait de voir comment les données numériques dans les tableaux et les graphes sont traitées par les élèves, et quelle est la signification construite en relation avec le modèle physique. C'est l'une des pistes de recherche que je poursuis actuellement, en collaboration avec des collègues en didactique des mathématiques et de la biologie dans le cadre d'un projet de recherche européen (FASMed<sup>97</sup>).

Les évolutions des modélisations des élèves sont à mettre en relation avec l'évolution des faisceaux sémiotiques. Ce sont les analyses synchroniques (mobilisation concomitante et articulation de différents registres) et diachroniques (évolution dans le temps des registres et de leurs articulations) qui ont montré l'évolution des modélisations dans la classe. Ces deux approches combinées permettent, dans

---

<sup>97</sup> Il s'agit d'un projet « Science in Society Collaborative Project of the European Community, European Union's Seventh Framework Programme », agrément n° 612337, <http://research.ncl.ac.uk/fasmed/>, qui a démarré en janvier 2014 et se terminera en décembre 2016. Ce projet regroupe neuf partenaires de sept pays européens et de l'Afrique du Sud. Il a pour objectif à développer l'utilisation des technologies dans les pratiques d'évaluation formative en classe à destination des élèves les plus en difficulté. Les résultats des recherches serviront à l'élaboration d'une boîte à outils permettant de promouvoir des pédagogies fondées sur l'évaluation formative en mathématiques et en sciences.

la lignée des travaux d'Arzarello et al. (2009), de mettre en évidence des processus d'étude : « *together, synchronic and diachronic analysis allow us to foreground the roles that the different types of signs (gestures, speech, inscriptions) play in students' cognitive processes. Considering semiotic bundles, we can fully grasp the evolution of learning processes and the role of gestures therein* » (Ibid., p. 101). Dans mes recherches, je n'ai pas la prétention d'attribuer un rôle particulier au geste dans le processus d'apprentissage. L'analyse de ce mode sémiotique, conjointement aux autres registres à disposition de l'enseignant et des élèves, a essentiellement pour objectif de mettre en évidence les informations communiquées sur les niveaux de modélisation et leur mise en relation.

La mise à l'épreuve de la cohérence du faisceau sémiotique pour progresser dans la compréhension des situations va dans le sens des *gesture-speech mismatches* de Goldin-Meadow (Goldin-Meadow, 1999 ; Goldin-Meadow & Wagner, 2005). Pour elle, « *gesture-speech mismatch is of particular interest to researchers because it is a characteristic of learners who are in transition with respect to a task* » (Goldin-Meadow, 1999, p. 424). Ces discordances entre le geste et la parole (correspondant dans mon cadre à un faisceau sémiotique non cohérent), indiquent qu'un apprentissage est en cours, et que la correspondance entre les deux modes va être atteinte (le faisceau sémiotique va devenir cohérent). Ainsi, Goldin-Meadow et Alibali (2013) suggèrent un mécanisme en trois étapes pour étudier l'évolution du couple geste-parole : « *(a) Children began in a state in which they predominantly produced gesture-speech match responses, expressing a single, incorrect strategy for solving the problems conveyed in both gesture and speech. (b) They then progressed to a state in which they produced gesture-speech mismatches, expressing more than one strategy, one in gesture and the other in speech. (c) Finally, they reached a state in which they produced gesture-speech match responses, now expressing a single, correct strategy conveyed in both gesture and speech.* » (Ibid., p. 267). Ce mécanisme est relativement similaire à l'évolution que j'ai mis en évidence en analysant les faisceaux sémiotiques dans le projet *Productive Multivocality* : (a) L'élève suivi produisait des dessins et des expériences en cohérence mais ne permettant pas à la lampe de briller. (b) Un dessin, non conforme à son expérience, lui est proposé. (c) Il parvient à produire un dessin et une expérience en cohérence avec le savoir académique. Si Goldin-Meadow et Wagner (2005) indiquent que ces discordances entre gestes et paroles sont des prédicats de l'apprentissage, mes résultats montrent que les élèves peuvent aussi enrichir un faisceau sémiotique tout en préservant sa cohérence lorsque les évolutions des registres sont conformes aux savoirs académiques. Ainsi, c'est bien la cohérence durable d'un faisceau sémiotique qui est la marque d'activités d'élèves en adéquation avec la physique (Lund & Bécu-Robinault, 2010b[10]).

L'ensemble de mes recherches sur les activités de modélisation et les registres sémiotiques, et plus particulièrement celles ayant trait à l'évolution des faisceaux sémiotiques, m'interroge sur ce qu'est l'apprentissage et la compréhension des concepts. Ces questionnements rejoignent ceux d'autres chercheurs utilisant la multimodalité pour étudier les situations d'enseignement (Radford & al., 2009).

## 2 Évolutions et apports spécifiques du cadre épistémologique sémiotique

### 2.1 Des hypothèses de conception et d'analyse à discuter

A l'issue de cette synthèse, certains des résultats que j'ai mis en évidence m'amènent à discuter, préciser des hypothèses que j'avais émises lors de la conception de mon cadre épistémologique-sémiotique. Ces hypothèses ont été mises à l'épreuve dans la conception et les analyses des séances d'enseignement lors des projets « énergie » et « collège ».

### 2.1.1 Donner aux élèves des outils conceptuels pour produire un faisceau sémiotique cohérent

Dans la conception des activités en électrocinétique, le groupe collaboratif DBR avait fait le choix d'un germe de modèle, qui devait être complété par les élèves, en fonction des composants à intégrer dans le circuit électrique (par exemple l'interrupteur). Le document distribué aux élèves précisait les propriétés des représentations sémiotiques utilisées, en lien avec le modèle à étudier. Ce même choix de présentation d'un « germe de modèle » avait été fait par les enseignants dans le projet de recherche-action (le modèle moléculaire pour interpréter l'augmentation de volume de l'eau dans le passage état liquide à état solide). Dans ce projet, l'enseignante n'avait pas indiqué les règles de manipulation des registres sémiotiques associées au modèle physique. En conséquence, les élèves ont modifié les règles de mise en œuvre des registres pour les rendre compatibles avec les modèles naïfs, quotidiens qu'ils estimaient pertinents pour expliquer ce phénomène. Ainsi, même lorsque l'enseignant met à disposition des registres sémiotiques, ceux-ci ne sont pas forcément assujettis, pour les élèves, à un modèle physique précis. Ce sont bien les règles d'utilisation des registres mis à disposition qui reflètent les propriétés du modèle à mettre en œuvre ou à construire. Les liens étroits existant entre modèle et représentations sémiotiques ne doivent pas laisser croire que l'on peut enseigner ces représentations en lieu et place du modèle physique. L'introduction d'un germe de modèle ne doit pas être confondue avec la mise à disposition de représentations sémiotiques à agencer, compléter.

Dans une perspective similaire, le registre sémiotique « dessin » avait été envisagé, conformément à Ainsworth et al. (2011) comme permettant aux élèves de projeter leurs propres idées, constituant ainsi un premier pas vers la compréhension des conventions de schématisation et une étape du raisonnement orientée vers les objets à manipuler. Sur la base de cette hypothèse, les premières activités en électrocinétique en cinquième étaient orientées vers la production de dessins. Or, lorsque le dessin produit est trop éloigné des savoirs scolaires, ce registre ne suffit pas pour construire du sens aux objets manipulés. Le modèle physique ne peut donc pas être construit uniquement sur la base de dessins : ce registre n'est pas le plus pertinent pour identifier les éléments saillants de la situation expérimentale. Ce registre peut être combiné avec celui de la langue naturelle, par exemple lors d'interactions avec l'enseignant en classe entière, afin d'aider à l'identification des éléments à considérer. En d'autres mots, certains registres seraient plus appropriés pour relever les affordances du matériel à manipuler (Kress & al., 2001). C'est ensuite l'assemblage des registres sémiotiques en un faisceau sémiotique cohérent qui permet d'identifier les éléments pertinents et de construire du sens du point de vue du modèle physique. Cette hypothèse est similaire à celle de Linder (2013) « *the affordance attributes of each of the representations in a critical constellation work together to generate a collective disciplinary affordance* » (*Ibid.*, p. 44). La cohérence du faisceau sémiotique est assurée par les propriétés du modèle physique étudié.

### 2.1.2 Deux niveaux pour la mesure : la mesure comme processus et la mesure comme résultat

Dans la présentation des niveaux de modélisation, j'avais associé le niveau de la mesure au monde des objets et événements d'Andrée Tiberghien (1994). Or, si effectivement la mesure relève de ce monde lorsqu'elle est prélevée dans l'environnement, elle est progressivement intégrée, au fil des traitements opérés par les élèves, au niveau du modèle (physique ou mathématique selon les cas). L'étude de cas que j'ai présentée ne suffit pas à affirmer que les mesures seront ensuite définitivement intégrées à ce niveau. Il est plus probable qu'en fait, il y ait deux niveaux de modélisation relatifs à la mesure. Le premier niveau est celui de *la mesure en cours d'acquisition*. La mesure est ici un processus. Ce niveau correspond aux moments où les élèves ont effectivement la possibilité de mettre en relation les données



quantitatives prélevées, les appareils de mesure, et le contexte d'expérimentation. Le deuxième niveau serait celui de *la mesure figée* (sur un support papier, numérique), la mesure étant alors un résultat. Il s'agit d'un niveau de modélisation émergeant suite à l'inscription des mesures sur un support, à partir duquel elles seront traitées pour être mettre en relation les grandeurs physiques.

### 2.1.3 Les conditions d'évolutions des modélisations et faisceaux sémiotiques

L'analyse des faisceaux sémiotiques élaborés progressivement par les élèves indique que lorsque leurs productions sont en conformité avec le savoir scolaire, alors il est possible de complexifier ce faisceau avec de nouvelles représentations, associées à des éléments du modèle. Ce résultat peut être mis en parallèle avec les gestes de l'enseignant pour introduire des éléments qui paraissent, à première vue, non encore accessibles aux élèves (par exemple, l'interrupteur ou les faisceaux de lumière convergents). Dans les études de cas présentées, les éléments sont introduits par l'enseignant alors que les élèves produisent des représentations sémiotiques en conformité avec les savoirs académiques (même s'ils ne relèvent pas du niveau du modèle physique). Selon les résultats obtenus sur les faisceaux des élèves, ces éléments introduits par l'enseignant, complexifiant le faisceau sémiotique des élèves, pourraient également contribuer au développement ultérieur des modélisations des élèves. Cette hypothèse serait à affiner dans le futur, en prenant appui sur les résultats de Goldin-Meadow (Goldin-Meadow, 1999 ; Goldin-Meadow & Wagner, 2005 ; Goldin-Meadow & Alibali, 2013) qui montrent que les élèves ne peuvent apprendre que lorsque les gestes et le discours ne sont pas en accord. Ce dernier point interroge les conditions de l'apprentissage des modèles scolaires.

### 2.1.4 Multiplicité ou unicité des registres sémiotiques

De nombreuses recherches préconisent d'introduire des registres sémiotiques multiples pour aider les élèves à traiter les activités proposées (Linder, 2013) et développer des stratégies scientifiques (Kohl & al., 2007). En parallèle, ces mêmes courants soulèvent la difficulté des élèves à utiliser le registre approprié pour résoudre un problème « *novices may not always use the most effective representation when they attempt to solve a problem* » (Rosengrant, 2009, p. 2). Dans la présentation du cadre épistémologique au chapitre 4 (paragraphe 3.2.2, p. 84) je m'étais appuyée sur les travaux d'Ainsworth (Ainsworth, 2006 ; Ainsworth & al., 2011), qui indique que la mobilisation de représentations sémiotiques contenant un minimum d'informations simplifie leur appropriation par les élèves. Ce choix implique de s'appuyer sur des représentations multiples, ce qui en définitive complexifie l'apprentissage. Cela m'avait entraîné à concevoir des séances dans lesquelles les modèles à enseigner répondaient à un équilibre entre la simplicité de chacune des représentations multiples, et la complexité d'une représentation unique. La mise en perspective des approches incitant à la multimodalité, inhérente au fonctionnement de la physique, et à l'équilibre entre simplicité et complexité des représentations sémiotiques multiples ou uniques pour aider à l'apprentissage, m'incite aujourd'hui à choisir, pour la conception de séquences d'enseignement, une représentation sémiotique simple et unique dans les premiers temps, puis à progressivement introduire de nouvelles représentations sémiotiques, dont la complexité augmente progressivement.

Par ailleurs, mes résultats montrent que les registres proposés ne peuvent être enseignés indépendamment des règles de mises en œuvre liées au modèle physique. La difficulté est donc de proposer progressivement des registres différents de façon à ce que les élèves effectuent des conversions entre ces différents registres, tout en veillant à ce que les règles d'utilisation de ces registres et leurs articulations avec les modèles scolaires soient compris par les élèves. Ainsi, l'inflation des registres sémiotiques à disposition va de pair avec celle de la complexité des éléments du modèle à articuler. Ces

résultats, montrant qu'il est très difficile d'initier un nouveau contenu tout en présentant de multiples registres sémiotiques, plaident en faveur de la simplicité et de l'unicité du premier registre présenté.

## 2.2 Les apports spécifiques du CÉS

L'interprétation de certains des résultats produits par mon cadre épistémo-sémiotique va dans le sens de recherches conduites sur la base d'autres cadres théoriques, tout en donnant une interprétation en termes de modélisation et de représentation sémiotique. L'objectif de cette partie n'est pas de donner une liste exhaustive des liens à tisser avec les recherches en didactique de la physique ou les domaines de recherche connexes, mais de montrer, sur la base de quelques exemples, qu'il est possible d'entrevoir de nouveaux projets de recherches mettant en jeu mon cadre épistémo-sémiotique et d'autres cadres théoriques ou résultats de recherche.

M'appuyant initialement sur des cadres théoriques communs en didactique des sciences et des mathématiques, j'ai complété mon approche par des éléments issus d'autres disciplines, telles que les sciences du langage, les sciences cognitives ou la psychologie. Il en résulte un cadre donnant à voir des aspects relatifs au savoir, aux interactions sociales et à l'évolution des connaissances.

### 2.2.1 Les effets liés au contrat didactique

Les résultats de mes recherches sont compatibles avec les effets de contrat largement étudiés en didactique (Brousseau, 2004) : la manipulation d'objets lors d'une séance donnée conduit, par effet de contrat didactique, à intégrer de manière stable (durable) les éléments matériels (objets manipulés, situations de référence) au niveau des objets et événements. Cette interprétation peut être mise en relation avec les évolutions des faisceaux sémiotiques et donc des modélisations successives des élèves : lorsqu'un élément est présenté pour être étudié au cours d'une séance, les élèves l'intègrent à leur faisceau sémiotique, en relation à un niveau de modélisation (sous forme d'un registre sémiotique considéré comme pertinent à ce moment de la séquence). Ce faisceau sémiotique va progressivement être complété tout au long de la séquence d'enseignement relative à la même thématique. Ce n'est que lorsque les éléments ne sont pas en conformité avec les savoirs académiques qu'ils sont écartés du faisceau sémiotique en cours de construction. Il s'agirait désormais de préciser quels sont les critères qui aident les élèves à associer ou non des éléments matériels ou conceptuels d'une situation d'enseignement à un niveau de modélisation.

### 2.2.2 Conceptions et modes de raisonnement

Mes analyses ont mis en évidence des conceptions déjà étudiées en didactique ou des modes de raisonnements d'élèves non conformes aux savoirs académiques. C'est par exemple le cas pour la production d'une lumière blanche dans la séance sur la synthèse additive : l'analyse montrait que pour les élèves, la lumière à la sortie d'un filtre est de la couleur du filtre (Bravo & Pesa, 2005). Les discours et les gestes des élèves indiquaient aussi comment ils envisageaient de disposer les filtres (les uns à la suite des autres). Ces résultats montrent, à l'instar de ceux de Givry et Roth (2006), que les connaissances mises en œuvre par les élèves, leurs conceptions, peuvent être analysées sur la base des faisceaux sémiotiques construits.

Les faisceaux sémiotiques doivent être lus au regard des niveaux de modélisation auxquels ils font référence. Des difficultés relatives à la confusion des interprétations microscopique et macroscopique des propriétés de la matière ont été relevées dans l'une de mes recherches. Cette confusion a fait l'objet de nombreuses publications (voir par exemple : Barlet & Plouin, 1997 ; Kozma & Russel, 1997). J'ai interprété ces difficultés d'élèves comme liées au recours à un modèle naïf (mettant en jeu des

connaissances de la vie quotidienne), et ce, quel que soit le type de représentations sémiotiques à disposition des élèves. Mes analyses indiquent que les élèves sont capables de transférer des règles d'utilisation des registres sémiotiques d'un modèle naïf à un modèle scientifique. Ainsi, les élèves adaptent les représentations sémiotiques pour rester en conformité avec les modèles qu'ils estiment légitimes pour interpréter les situations étudiées.

En analysant les niveaux de modélisation utilisés dans les raisonnements des élèves, j'ai également montré que pour traiter les données quantitatives recueillies, les élèves s'appuient spontanément sur le modèle mathématique. Cela les conduit à perdre, au moins momentanément, la signification des données quantitatives du point de vue du modèle physique. Ces données sont alors modifiées, mises en relation sans que cette signification soit interrogée, que ce soit sur la légitimité des opérations effectuées, ou la validité des résultats quantitatifs obtenus. Ces résultats révèlent la difficulté des élèves à identifier les limites des modèles, que ces modèles soient scolaires ou non (Dupin & Johsua, 1994 ; Martinand, 1996 ; Larcher, 1996). Pour éviter que l'élève fasse usage d'un modèle non adéquat, ou hors de son domaine de validité, Gaidioz et Tiberghien (2003) précisent qu'il est « *sans doute nécessaire d'évoquer explicitement la notion de modèle et celle de son champ de validité ainsi que, quand cela est approprié, les raisons et les conséquences du choix du modèle par rapport à une question donnée* » (Ibid., p. 73). Cette proposition va dans le sens d'un enseignement explicite du fonctionnement de la science, en parallèle à un enseignement des contenus scientifiques.

### 2.2.3 Rôle du geste dans la construction du modèle physique

L'intérêt d'étudier les pratiques d'études et d'enseignement au regard de mon cadre épistémosémiotique réside dans la capacité de ce cadre à interpréter parallèlement les productions de l'enseignant et des élèves sur la base d'hypothèses sur le fonctionnement de la physique (la modélisation), et sur le fonctionnement cognitif. En effet, j'ai considéré les représentations sémiotiques comme des « *productions constituées par l'emploi de signes appartenant à un même système de représentation [...] elles semblent être le moyen dont un individu dispose pour extérioriser ses représentation mentales, c'est à dire pour les rendre visibles ou accessibles à autrui* » (Duval, 1995, p. 2). A ces registres sémiotiques, j'ai adjoint les gestes comme fenêtre d'accès à la connaissance (Mc Neill, 1992 ; Alibali & al., 1999 ; Radford, 2009). L'intégration de cette modalité de communication, analysée conjointement à la parole, permet de mieux comprendre la complexité des situations d'enseignement-apprentissage, en particulier quand les élèves doivent communiquer sur des objets, des événements, pour lesquels ils ne disposent pas encore des termes scientifiques relevant des modèles en jeu. Par le geste, il est possible de donner une description globale et spatiale de la situation, ce qui conduit à sélectionner et organiser les informations en unités pouvant être communiquées simultanément à la parole (Goldin-Meadow & Alibali 2013). Cette fonction de sélection des données pertinentes donne à voir la modélisation de la situation par les élèves. En ce sens, le geste, conjointement aux autres registres sémiotiques, contribue pleinement à la construction d'un modèle scientifique par les élèves.

### 2.2.4 Interactions, modélisation et faisceaux sémiotiques

Pour les analyses comme pour la conception des séances d'enseignement, des hypothèses sur le rôle des interactions pour l'apprentissage ont été faites. La prise en charge des registres sémiotiques pour communiquer, entre pairs ou avec l'enseignant participe de cette approche : « *representations we use in physics (such as diagrams, graphs, equations, spoken and written language, gestures, etc) play a critical role in the effectiveness of the interactive engagement between students in these learning environments* » (Fredlund & al., 2012, p. 658). Ce ne sont pas les seuls éléments qui contribuent à la communication : la posture, le regard ont également leur importance dans la compréhension mutuelle, dans la construction du sens des activités

en classe. C'est ce qu'étudie Forest (2006 ; 2008) dans ses analyses proxémiques. « *Dès leur entrée dans la classe et tout au long de leur enseignement, les professeurs manifestent par leurs gestes et leurs positions un certain nombre de significations. [...] Les modalités non verbales d'échange de significations entre le professeur et les élèves jouent un rôle non négligeable dans la qualité et l'efficacité de la relation didactique.* » (Forest, 2006, p. 73). Je partage avec Forest l'hypothèse que c'est bien l'ensemble des modalités de communication, mais aussi leur articulation qui contribuent à construire un sens commun qui permettra de progresser vers des savoirs académiques. Forest précise que les analyses sur les gestes, les postures doivent se combiner à des analyses didactiques pour mettre en évidence les contenus disciplinaires. C'est aussi le choix que j'ai effectué, en m'appuyant sur des critères d'analyse relatifs au fonctionnement du savoir. La combinaison des analyses sur la modélisation et les registres sémiotiques, avec un élargissement des modalités de communication aux gestes, associés à la parole, permet de prendre en charge l'une des spécificités de l'élaboration des connaissances en physique, à savoir le rapport au monde réel. Ce cadre d'analyse m'a permis de mieux prendre en charge la complexité des contenus communiqués en classe de physique.

Les limites de l'analyse du discours seul avaient déjà été questionnées au cours de ma thèse. Effectivement, la dernière étude que j'avais conduite (Bécu-Robinault, 1997a) avait pour objectif de mettre en évidence les éléments sur lesquels les élèves avaient besoin de communiquer de leur expérience, lorsque le matériel utilisé n'est pas une référence commune et qu'un accord est requis pour produire une réponse commune sur les expériences<sup>98</sup>. A ces fins, chaque binôme d'élèves était séparé, et les élèves disposaient chacun d'une interface numérique pour communiquer avec leur partenaire. Les manipulations étaient présentées comme identiques à tous les élèves, avec toutefois du matériel dont les caractéristiques variaient. L'analyse des activités de modélisation dans les échanges sur l'interface de communication (équivalente à un Chat aujourd'hui) révélait un faible nombre de relations établies entre les niveaux de modélisation et une contrainte forte due à l'interface, incitant les élèves à ne considérer que les informations sur l'écran de l'ordinateur et à négliger le rapport aux objets réels. A ce moment, je ne disposais pas d'enregistrements vidéo me permettant d'étudier si les gestes étaient orientés vers la seule interface numérique. Il me semble intéressant aujourd'hui, sur la base de résultats obtenus dans d'autres recherches (notamment sur la simulation de la synthèse additive, le projet Productive Multivocality) et de l'évolution de mon cadre épistémo-sémiotique, d'étudier les interactions plus globalement. Par exemple, comment, dans les situations mettant en œuvre des nouvelles technologies, les différentes modalités de communication et registres sémiotiques mis en œuvre, favorisent-elles l'émergence d'un espace partagé favorisant la discussion des connaissances et la mise en relation des niveaux de modélisation et des représentations sémiotiques.

### 2.3 Les limites du cadre épistémo-sémiotique

Les composantes de mon cadre d'analyse et de conception donnent à voir une facette des processus cognitifs lors des pratiques d'étude, en parallèle avec les pratiques d'enseignement, tout en se fondant sur des hypothèses sur le fonctionnement des savoirs en jeu. Mes travaux ont émergé dans un contexte particulier qui s'apparente à la Design-Based Research. Cette méthodologie s'est avérée pertinente pour élaborer un cadre utile à la fois à l'analyse des pratiques d'études d'enseignement et à la conception des activités d'enseignement-apprentissage. Le domaine de validité de ce cadre d'analyse ne se restreint pas à ces projets collaboratifs. J'ai mis en évidence ses apports lors de recherches dans d'autres contextes. Malgré tout l'intérêt et la portée de ce cadre, exposés au cours de ce chapitre,

---

<sup>98</sup> L'expérience à réaliser et l'activité proposée était fondée sur le TP « puissance » analysé au chapitre précédent.

quelques questions demeurent aujourd'hui sans réponse, et limitent la portée des analyses que j'ai produites et des implications pour la conception des séances d'enseignement.

### 2.3.1 Les limites des analyses réalisées

Une première limite est associée à ce que j'ai analysé comme représentation sémiotique. En effet, en quoi les gestes produits sont spécifiques des situations d'enseignement proposées ? Le contenu des registres dépend des éléments à disposition et à représenter. Ainsi, le dessin d'une pile, avec l'identification éventuelle des deux bornes, dépend de la pile manipulée. Une pile ronde et une pile plate n'ont pas la même forme, les caractéristiques saillantes dépendront donc du type de pile. De même, les gestes accompagnant le discours sur le fonctionnement des objets dépendent des objets, du contexte matériel dans lequel enseignant et élèves interagissent. Plus généralement, les registres sémiotiques associés aux niveaux de modélisation ne doivent pas être envisagés comme étant inconditionnellement pertinents, mais comme facilitant certaines tâches : *« a single type of representation is rarely maximally effective for all purposes, but rather particular representations facilitate performance on certain tasks »* (Ainsworth & VanLabeke, 2004, p. 242). Du fait que les élèves ont tendance à prélever des informations à représenter sur la base de connaissances non nécessairement en adéquation avec les savoirs scolaires, il est nécessaire d'identifier *a priori* les caractéristiques saillantes des éléments du contexte, et d'indiquer comment ces caractéristiques pourront être traduites dans la diversité des registres à disposition. Le geste étant produit spontanément, simultanément au discours oral, il convient de veiller à ce que l'affordance des objets conduise à leur utilisation en cohérence avec les savoirs en jeu : *« the understanding of novices is both enabled and constrained by the surface features of the representation that is used »*, (Kozma & Russel, 1997, p. 951). Se pose alors la question de la possibilité de transfert de ces gestes, porteurs de significations du point de vue du modèle, vers d'autres situations matérielles.

Par ailleurs, les analyses que j'ai produites autour du geste comme mode sémiotique me conduisent à préciser les critères de sélection des gestes pertinents à étudier. Si j'ai, autant que possible, analysé le geste conjointement à la parole, il s'avère toutefois que certains gestes analysés ne sont pas co-verbaux, mais sont ou deviennent des emblèmes : les élèves, l'enseignant peuvent mimer le fonctionnement d'objets, sans que ces gestes accompagnent un quelconque discours. Pourtant, ces gestes semblent compris et permettent d'évoluer vers la construction de nouveaux savoirs. Il reste à se doter d'outils qui valideraient cette hypothèse de compréhension partagée. En effet, il n'est pas toujours évident que la signification des gestes produits lors des interactions soit identique pour les interactants : *« la familiarité de ces éléments non verbaux, abondamment utilisés dans la communication ordinaire, représente un obstacle en rendant invisibles des comportements appris pour certains dès l'enfance, par imitation, et spécifiés ensuite dans les situations que nous étudions »* (Forest, 2006, p. 73). Cela va de pair avec le contexte dans lequel les élèves et l'enseignant interagissent. Ce contexte peut être analysé comme un milieu, ou plutôt des milieux, qui seront différents pour l'élève, l'enseignant (Margolinas, 2004) et qui évolueront au fur et à mesure de la séance, en fonction des activités conduites, des objectifs visés par l'enseignant (Amade-Escot & Venturini, 2009). Les éléments considérés dépendent également des gestes, de la position spatiale de l'enseignant et des élèves : *« context is not simply a set of features presupposed or invoked by a strip of talk, but is itself a dynamic, temporally unfolding process accomplished through the ongoing rearrangement of structures in the talk, participants' bodies, relevant artifacts, spaces, and features of the material surround that are the focus of the participants' scrutiny »* (Goodwin, 2000, p. 1519). L'intégration des différentes modalités de communication dans la construction des faisceaux sémiotiques conduit donc à définir le milieu en s'appuyant sur les caractères des éléments considérés comme saillants par les interactants, qu'ils soient pertinents ou non au regard des objectifs d'enseignement.

### 2.3.2 Les limites du cadre épistémo-sémiotique

Le cadre épistémo-sémiotique ne suffit évidemment pas pour concevoir des séances de physique adaptées aux élèves, à leurs difficultés, aux contraintes d'enseignement. Au cours du chapitre 5, j'ai précisé les autres composantes du cadre de conception : le cadre épistémo-sémiotique s'articule effectivement avec d'autres cadres théoriques pour intégrer la diversité des besoins des enseignants et des élèves. Je ne reviendrai pas ici sur ces résultats de la recherche, mais il faut conserver à l'esprit que c'est bien une panoplie de travaux de recherche qui a contribué à l'élaboration des séances. La combinaison de l'ensemble de ces résultats laisse entrevoir des perspectives de collaborations de recherche, tant pour concevoir des séquences, que pour analyser les pratiques d'études et d'enseignement.

Il faut aussi souligner que dans toutes mes recherches, ce sont les interactions entre élèves, ou entre élèves et enseignant qui ont été analysées. Cela suppose que, pour d'utiliser ce cadre d'analyse, les acteurs doivent interagir. Ce cadre a aussi été mis à l'épreuve pour concevoir des séquences d'enseignement, dans des processus de type Design-Based Research. Il est possible d'envisager l'utilisation des descripteurs de ce cadre pour d'autres types d'analyses, comme celle des manuels, de sites internet ou toute autre ressource mobilisée par les enseignants dans le cadre de leurs pratiques ordinaires. Cela conduirait éventuellement à adapter les définitions de chacun de ces descripteurs et à préciser comment les niveaux de modélisation, les représentations sémiotiques associées peuvent être mis en relation et convertis.

Enfin, j'ai montré dans le chapitre 5 que le cadre épistémo-sémiotique est un cadre commun pour la conception et l'analyse. Une des limites à l'utilisation de ce cadre en phase de conception provient des connaissances des enseignants sur les modèles et les registres sémiotiques en classe de sciences physiques. Jusqu'alors, la conception outillée par ce cadre a été réalisée dans des projets de type Design-Based Research, ou plus généralement des projets collaboratifs, dans lesquels le chercheur est garant des hypothèses associées à ce cadre. Pour que les enseignants s'en emparent dans le cadre de séances ordinaires, il faudrait leur communiquer l'ensemble des composants de ce cadre. Or, si certains des éléments sont effectivement communicables aux enseignants pour concevoir des activités, comme les articulations entre niveaux de modélisation, cela ne semble pas être le cas pour les modalités non-verbales. Ces modalités sont le plus souvent spontanément utilisées en accompagnement du discours oral et la communication de leur rôle aux enseignants semble contre-productive pour l'efficacité de la relation didactique. De fait, les réactions des enseignants suite à la communication de ce rôle ont été pour le moins surprenantes lors des cours suivants : un des enseignants a fait le cours suivant avec les mains dans les poches<sup>99</sup>, une autre enseignante a posé de nombreuses questions sur le type de geste à produire ou à éviter<sup>100</sup>. Ces réactions posent questions quant à la possibilité ou l'intérêt de former les enseignants à l'application de l'ensemble des composantes du cadre épistémo-sémiotique. Il s'avère toutefois, au fil des formations dispensées, lors de l'intégration de nouveaux collègues, que les enseignants participant aux groupes collaboratifs DBR se révèlent être de fervents défenseurs de la mise en œuvre de ce cadre pour concevoir de nouvelles situations d'enseignement.

---

<sup>99</sup> Lors de la discussion post-séance avec cet enseignant, il a déclaré avoir adopté cette posture inconsciemment. Pendant les cours précédents, cet enseignant produisait naturellement des gestes lors de ses interactions avec les élèves.

<sup>100</sup> Pendant la séance suivante, que j'ai filmée avec Géraldine Boivin, doctorante réalisant ses recherches dans cette classe, l'enseignante nous regardait avant de produire des gestes.





## - Chapitre 8 -

# Perspectives de recherches ouvertes par le CES

---

*Dans cette partie, je développe quelques perspectives de recherches ouvertes par la discussion de mes résultats ou par les projets dans lesquels je suis actuellement impliquée. L'apport du cadre épistémico-sémiotique sera discuté au regard d'autres cadres pour une analyse conjuguée des processus d'enseignement et d'étude. Ces recherches pourront également faire évoluer le CES, ses composantes et son champ d'application.*

Ce point d'étape sur mes recherches depuis 1993, ouvre de nouvelles perspectives théoriques et méthodologiques, associées à des projets dans lesquels je suis impliquée ou des thèses que je co-dirige. D'ores et déjà, des orientations nouvelles sont données dans les thèses et travaux de mémoire encadrés. Je n'exposerai pas les résultats déjà obtenus ou à venir dans cette partie, laissant la primeur aux étudiants en thèse de présenter et publier ces résultats.

Cette note ne fait pas état de toutes les recherches que j'ai entreprises ou que je dirige actuellement, mon choix étant de ne rapporter que les résultats explicitement centrés sur le cadre épistémico-sémiotique. Toutefois, il me paraît désormais possible d'entrevoir des ponts à établir entre ces recherches et les apports du cadre épistémico-sémiotique.

Au-delà des perspectives présentées au fil de ma synthèse au chapitre précédent, j'esquisse dans ce dernier chapitre des répercussions à plus ou moins long terme des résultats de mes travaux antérieurs sur les recherches en cours et je propose deux perspectives dans lesquelles la mobilisation du cadre épistémico-sémiotique me paraît particulièrement pertinente.

## 1 Répercussions sur les recherches en cours

### 1.1 Évolution des niveaux de modélisations

Lors de l'exposé de mon cadre théorique et des critères pour analyser les activités des élèves, j'avais identifié cinq niveaux de modélisation. La définition de ces niveaux, fournie au chapitre 4 (p. 93) n'était initialement fonction ni des niveaux d'enseignement, ni de l'évolution des traitements opérés par les élèves à chacun de ces niveaux. En effet, les niveaux de modélisation étaient considérés comme stables au cours du temps et des apprentissages. Toutefois, il est apparu au fil de mes recherches que le niveau de la mesure n'est pas toujours à associer au monde des objets et des événements : selon l'activité conduite autour de la mesure (prise d'information sur un appareil ou lecture d'une information sur un document papier) la mesure peut relever du monde des objets et événements ou du monde des théories et modèles. Ainsi, la position de ce niveau de modélisation par rapport aux deux

mondes de Tiberghien (1994) évolue en fonction du niveau d'enseignement, des activités conduites, et des types d'informations à traiter. La définition des autres niveaux de modélisation peut donc être questionnée en fonction des connaissances développées progressivement par les élèves.

C'est dans cette perspective que le cadre épistémo-sémiotique éclaire des résultats obtenus dans le cadre de la thèse de Géraldine Boivin-Delpieu que j'encadre. Sa recherche porte sur les déterminants de l'action professorale lors de la préparation et la mise en œuvre de séances de sciences au cycle 3<sup>101</sup>. Nous nous sommes essentiellement focalisées sur des séquences sur les phases de la Lune, proposées par deux enseignants ayant suivi un cursus universitaire scientifique. Le cadre théorique principal est celui de la Théorie de l'Action Conjointe en Didactique (Sensevy & Mercier, 2007). Afin de mettre en évidence les stratégies d'enseignement liées au fonctionnement de la physique, cette étude est complétée par une analyse en termes de niveaux de modélisation.

Au cours des séances de classe, divers documents et objets sont fournis aux élèves afin de mettre en évidence d'une part le caractère cyclique des phases de la Lune et d'autre part les positions relatives du Soleil, de la Terre, de la Lune et de l'observateur permettant leur observation : un calendrier des lunaïson, un document papier présentant des photographies de la Lune sur un mois, des boules de polystyrènes et une lampe de poche, une simulation informatique... Sans reprendre les analyses réalisées par Géraldine Boivin qui ont fait l'objet de plusieurs communications et publications (Boivin-Delpieu & al., 2014a[16], Boivin-Delpieu & al., 2014b, Boivin-Delpieu & Bécu-Robinault, soumis), je fournis ici deux exemples d'éléments qui, selon les cas, relèvent du monde des objets et événements ou du monde des théories et modèles. Ces exemples alimentent la réflexion conduite sur l'évolution de la définition des niveaux de modélisation.

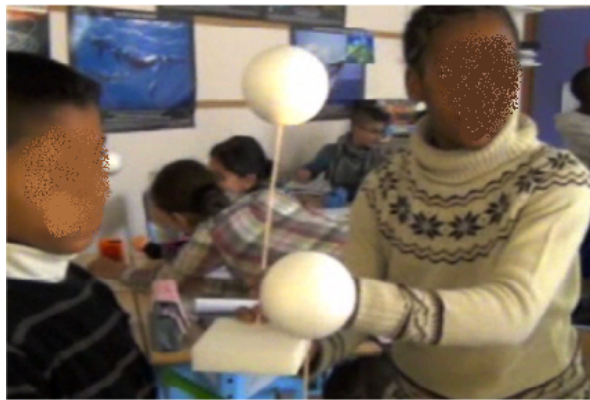
Dans l'idée de montrer aux élèves qu'il est possible de prévoir à très long terme les phases de la Lune, et non la présence de nuages (les élèves avaient fait l'hypothèse que la forme apparente de la Lune était due à la présence de nuages), l'enseignant donne aux élèves un calendrier des lunaïsons à comparer avec les prévisions météorologiques usuelles. Ce document a un statut ambigu à ce moment de la séance. En effet, quand le cycle des phases de la Lune n'a pas encore acquis le statut de savoir institutionnalisé, ce document apparaît comme relevant des objets et des événements : le modèle sous-jacent n'étant pas explicité, les élèves observent, sur le document, les différentes formes de la Lune représentées, sans percevoir le modèle explicatif permettant d'associer ces formes à des phases et donc de les prévoir sur la base d'un calcul. Quand la méthode de détermination des phases de la Lune est établie (cycle régulier), ce document pourra être considéré comme une représentation associée au niveau du modèle physique. Ainsi, un même document mis à disposition des élèves peut relever d'un niveau ou d'un autre, en fonction des niveaux de modélisation travaillés au préalable et donc des éléments de modèle enseignés. Les critères d'association d'un élément à un niveau de modélisation donné dépendent donc des connaissances préalables des élèves et des actions envisagées sur cet élément.

De même, la modélisation des phases de la Lune avec une maquette composée de boules de polystyrène et d'une lampe de poche, suggérée dans les programmes officiels et réalisée par les deux

---

<sup>101</sup> Cette thèse a été associée au projet « ruptures et continuités » que j'ai animé, concernant la comparaison des pratiques de l'enseignement des sciences au primaire et au collège, sur la base de contenus d'enseignements proches (germination en SVT et phases de la Lune en SPC).

enseignants observés ne relève pas nécessairement du niveau du modèle physique<sup>102</sup>. Pour faire fonctionner correctement cette maquette, des lois et propriétés seraient à respecter (plans de rotation Soleil-Terre et Terre-Lune, rotations de la Terre, de la Lune, distance, durée...). Quand ces propriétés ne sont pas fournies, les élèves doivent éclairer des objets et se placer dans une position rendant possible l'observation des parties éclairées de la boule de polystyrène, sans que cette observation soit discutée au regard de la situation réelle de visibilité des phases de la Lune par un observateur terrestre. Il s'agit donc, pour les élèves, de provoquer des observations sur les zones éclairées de la boule de polystyrène et non de simuler les phases de la Lune. Le caractère cyclique, les positions relatives des objets, les conditions d'observation (jour/nuit notamment) ne pourront être discutées car, à ce moment de la séquence, ils n'ont pas encore été explicités par l'enseignant. Par exemple, dans la Figure 79, si un éclairage de la boule de polystyrène au premier plan, représentant la Lune, est effectivement visible, la position d'aucun des trois élèves impliqués dans cette maquette (le troisième n'est pas visible, il est sur la droite par rapport à la photo, il tient la lampe de poche) n'est compatible avec la position d'un observateur sur la Terre. Dans ce cas, la maquette réalisée ne peut ni être mise en relation avec les phases de la Lune observée, ni contribuer à l'élaboration de savoirs en cohérence avec le savoir académique.



**Figure 79: la maquette réalisée par des élèves de CM2 pour expliquer les phases de la Lune**

Ces résultats interrogent sur le statut de cette « modélisation » inscrite dans les programmes. Selon les niveaux d'enseignement et les éléments du modèle physique fournis aux élèves, ces modélisations relèvent soit du monde des théories, soit des objets et événements. Pour véritablement être associée à un niveau « modèle », les propriétés, lois et hypothèses doivent être explicitées : cette modélisation s'apparenterait alors au modèle matérialisé en chimie (Le Maréchal & Bécu-Robinault, 2006[5]). Faute d'explicitation des règles de fonctionnement de cette maquette ou modèle matérialisé, les élèves se retrouvent dans une situation proche de celle présentée au chapitre 6 sur le modèle moléculaire (paragraphe 3.4.2, p. 163) : les règles utilisées ou construites par les élèves ne seront pas nécessairement en adéquation avec les règles du modèle physique. En effet, tant que les enseignants ne fournissent pas ces éléments garantissant le bon fonctionnement de la représentation sémiotique associée au modèle, les élèves ne manipulent pas le modèle scientifique mais manipulent des objets pour rendre possible une observation. À terme, les élèves trouvent des règles, issues de leurs connaissances quotidiennes, ou

---

<sup>102</sup> Pour rappel, Walliser (1977) considère que les maquettes relèvent du niveau du modèle. Cela est cohérent pour les maquettes des scientifiques : les maquettes sont construites pour expliquer les relations entre grandeurs, les propriétés, elles reposent sur des hypothèses explicites. Pour les maquettes scolaires, cela n'est pas nécessairement le cas : dans les situations étudiées, les maquettes sont produites par les élèves pour trouver un modèle explicatif. Elles suppléent donc à l'impossibilité de réaliser une expérience avec les objets réels.

au hasard de la position relative des objets, mais ne manipulent pas réellement un modèle. La maquette (ou modélisation selon les termes des instructions officielles) apparaît donc, selon les moments, comme relevant du niveau des objets et événements, ou du niveau du modèle. Ce positionnement relatif des objets manipulés, mis en évidence à l'occasion de cette note de synthèse, est un aspect que j'ai proposé à Géraldine Boivin-Delpieu d'étudier dans sa thèse.

## 1.2 Analyse des ressources et documents des professeurs

Les ressources mobilisées par les enseignants s'appuient sur des niveaux de modélisation et des représentations variées. Si les enseignants prennent comme référence les instructions officielles, selon leurs connaissances pédagogiques sur les contenus disciplinaires, leurs représentations sur la science et son enseignement, ils peuvent choisir des documents pour élaborer leurs séances qui mettent en avant le modèle, les objets. Ces choix ont des conséquences sur les types de démarches en classe. Dans un contexte de réformes de l'enseignement scientifique proche de celui de la France, les enseignants libanais se trouvent en situation de concevoir des séquences d'enseignement dans lesquelles les élèves doivent être actifs et acteurs. Paradoxalement, peu d'enseignants disposent, dans leurs établissements, de moyens matériels suffisants pour la réalisation d'expériences en groupe. Ces injonctions officielles et ce contexte d'enseignement difficile sous-tendent un projet bilatéral France-Liban, dans lequel des chercheurs en didactique des mathématiques et des sciences des deux pays ont co-encadré trois thèses sur la caractérisation, l'utilisation et le devenir des ressources à disposition des enseignants libanais (Gueudet & Trouche, 2008). Dans le cadre de ce projet, j'encadre avec Layal Malkoun la thèse de Bassel Chazbeck sur le *Rôle des ressources pédagogiques dans l'élaboration d'activités basées sur la démarche d'investigation par des enseignants du secondaire*. Bassel Chazbeck étudie d'une part comment l'enseignant adapte les ressources pour articuler les différents niveaux de modélisation et d'autre part quelles sont les connaissances pédagogiques liées au contenu disciplinaire justifiant cette sélection et adaptation des ressources (Shulman, 1986 ; Van Driel & al., 1998 ; Magnusson & al., 1999 ; Bécu-Robinault, 2007[7]). Les analyses, en cours, portent sur des entretiens d'explicitation (Vermersch, 1994) et des enregistrements vidéo de séances de classe sur la notion de générateur en électricité. Les résultats devraient mettre en évidence l'influence des connaissances des enseignants relatives aux niveaux de modélisation sur le choix et l'adaptation des ressources.

Dans le cadre d'un projet financé par l'ANR (ReVEA) j'ai également proposé de prendre appui sur les critères d'analyses de mon cadre épistémo-sémiotique. L'objectif de ce projet est d'observer, pour chaque discipline, l'évolution des systèmes de ressources au cours du travail des professeurs. Il s'agira de comprendre comment un changement de programme ou de recommandations au niveau institutionnel, l'intégration d'un nouvel artefact, mais éventuellement aussi la participation à une action de formation continue, l'encadrement d'un stagiaire, ou le travail avec un nouveau niveau de classe, induisent une reconfiguration des ressources des professeurs. Dans ce projet, mon cadre épistémo-sémiotique sera mis à contribution afin d'analyser les ressources mobilisées par les enseignants pour élaborer leur séances de classe : ces ressources obéissent-elles à des contraintes en termes de niveaux de modélisation ? Comment ces niveaux sont-ils articulés dans les ressources ? Est-ce que les documents élaborés à destination des élèves suggèrent des articulations entre les niveaux de modélisation ? Ou celles-ci sont-elles déterminées, à partir de ces documents, dans les consignes orales lors des interactions en classe ? Quelles sont les représentations sémiotiques qui influencent le choix des enseignants ? En quoi cela modifie-t-il les documents élaborés à destination des élèves ? Ces questions seront abordées dès janvier 2015, essentiellement au niveau du lycée, en partenariat avec des chercheurs faisant référence à d'autres cadres d'analyse. Dans ce contexte, qui n'implique pas d'interactions entre enseignant et élèves, le cadre épistémo-sémiotique contribuera à définir les

descripteurs (niveaux de modélisation, registres sémiotiques), en association avec des connaissances supposées des élèves et des actions à mener en vue d'accompagner les pratiques d'étude et d'assurer les pratiques d'enseignement.

## 2 Perspectives de recherches

Dans cette partie, je propose deux perspectives de recherches à partir de projets dans lesquels je suis impliquée, et pour lesquelles le cadre épistémologique serait mis à contribution. Ces perspectives poursuivent les réflexions engagées suite aux résultats que j'ai discutés au chapitre 7, de manière à élargir le champ d'application du cadre épistémologique à la compréhension des activités de modélisation et de représentations avec des nouvelles technologies (objets tangibles, surfaces tactiles) ou à caractériser les consignes de l'enseignant et l'utilisation des niveaux de modélisation et des représentations par les élèves (incitations à l'action).

### 2.1 Modélisation, représentations, objets tangibles et surfaces tactiles

Dans ce paragraphe, je présente un projet de recherche prenant appui sur de nouvelles modalités d'articulations entre modèle physique et manipulation d'objets offertes par l'évolution des technologies numériques. Cette perspective de recherche s'inscrit dans le cadre d'un projet de développement d'application (Tactileo<sup>103</sup>), dans lequel j'anime un groupe collaboratif qui s'apparente à une recherche développement.

Les écrans, jusque récemment, étaient surtout des espaces d'affichage d'informations dont les modifications étaient dues à des actions conduites dans des espaces géographiques plus ou moins distants (souris, clavier). Avec les technologies tactiles, les écrans s'enrichissent de fonctions interactives, et ne sont plus uniquement des dispositifs de sortie, mais aussi d'entrée d'informations. Les tables tactiles incluent sur un même objet, la surface d'action et la surface d'observation (Coutaz & al., 2002). Par ailleurs, outre les possibilités désormais offertes de placer le doigt, la main de l'utilisateur directement à l'interaction homme-machine (interaction tactile), il est possible d'intégrer des objets quotidiens, identifiables par la machine (par le biais de puces RFID ou tags) : en se fondant sur leurs propriétés, la surface interactive simule alors leurs comportements ou présente des informations pertinentes les concernant (interaction tangible). Cette évolution va de pair avec celle des surfaces interactives proposant des applications logicielles dédiées à l'enseignement des sciences. D'ores et déjà, certains établissements se sont dotés de tablettes ou de tables tactiles. A l'heure actuelle, les interactions tangibles nécessitent l'utilisation de tables tactiles dont le principal intérêt, par rapport aux tablettes est

---

<sup>103</sup> Appel à projets « Services numériques innovants pour l'e-éducation » financé par le programme « développement de l'économie numérique » dans le cadre du Fonds national pour la Société Numérique (Caisse des Dépôts). Ce projet, porté par une société privée, Maskott, implique 6 autres partenaires : Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), Schuch Productions (entreprise), Institut Français de l'Éducation (IFE), Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), IUT Auvergne Le Puy-en-Velay, Microsoft (entreprise). Au niveau de l'IFE, plusieurs groupes disciplinaires ont été constitués sur les usages ou le développement d'applications pour l'enseignement des sciences. Dans ce projet, je travaille avec des enseignants de sciences physiques au collège et le CEA. Notre objectif est de développer une application, sur la base des activités développées en optique au sein des projets collège, proposant des manipulations et leur modélisation sur des surfaces tactiles.



de manipuler du matériel et non plus seulement des images. De plus, 4 élèves<sup>104</sup> peuvent collaborer sur la table qui détecte les contacts simultanés de plusieurs usagers. Cela permet aux élèves d'agir ensemble sur les objets disposés et les éléments représentés sur la table. Même si ces dispositifs technologiques sont encore coûteux, peu présents dans les établissements, il est possible d'en prévoir de futures exploitations.

Dans ce groupe de recherche développement (2 enseignants, 1 chercheur) que j'anime, le cahier des charges comprend le développement d'applications de simulations en optique avec une table tactile et des tablettes. L'application développée répond à un double jeu de contraintes : celles issues des recherches en didactique, notamment les résultats des analyses conduites au sein des projets collège, et celles issues des recherches en ergonomie liée l'équipe du CEA en charge du développement informatique. Le groupe collaboratif a adapté les séquences développées dans le cadre des projets Design-Based research au collège et a proposé des simulations sur la table tactile avec des objets tangibles pour compléter les expériences réalisées avec les objets réels. Il n'était effectivement pas question de supprimer complètement les expériences avec du matériel réel, mais de les combiner avec des expériences simulées sur la table tactile, avec des objets tangibles, afin d'aider les élèves à articuler les phénomènes observés avec leur représentation dans les termes du modèle<sup>105</sup>.

Outre le travail de scénarisation de ces outils numériques non encore familiers aux enseignants du projet, des réflexions sont engagées sur la nature des représentations sémiotiques à fournir aux élèves et l'articulation dynamique des niveaux de modélisation. La séquence d'enseignement et le logiciel sur les lumières colorées et la couleur des objets (classe de quatrième) ont été élaborés. Les expérimentations dans les classes sont prévues de Janvier à Juin 2015. Les perspectives de recherches sur ces implémentations font suite aux choix opérés en phase de conception.

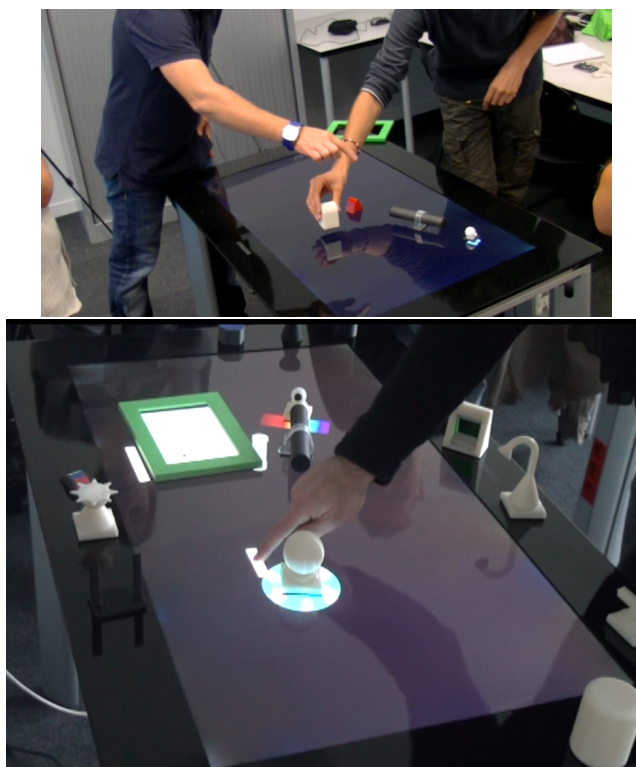
Dans un premier temps, le travail du groupe a porté sur le choix de la forme des objets tangibles à disposer sur la table et des images à associer à ces objets. Par exemple, les objets tangibles doivent être à la fois suffisamment génériques pour représenter une classe d'objets réels<sup>106</sup> et suffisamment figuratifs pour que les élèves ne s'interrogent pas sur la classe d'objets qu'ils représentent. Sur la Figure 80 en haut, sont disposés sur la table des objets tangibles : la source, l'œil, le spectroscopie et un objet rouge. Sur la même figure en bas, d'autres objets sont disposés sur le bord de la table : une source de lumière colorée, la source de lumière naturelle, un porte-filtre... On voit également sur la table un cadre dans lequel apparaît l'interprétation de la situation dans les termes du modèle.

---

<sup>104</sup> Compte tenu de la taille de la table, nous avons fait le choix de faire travailler 4 élèves simultanément sur une même table. L'interface de la table est toutefois capable de détecter jusqu'à 50 points simultanés de tactilisation.

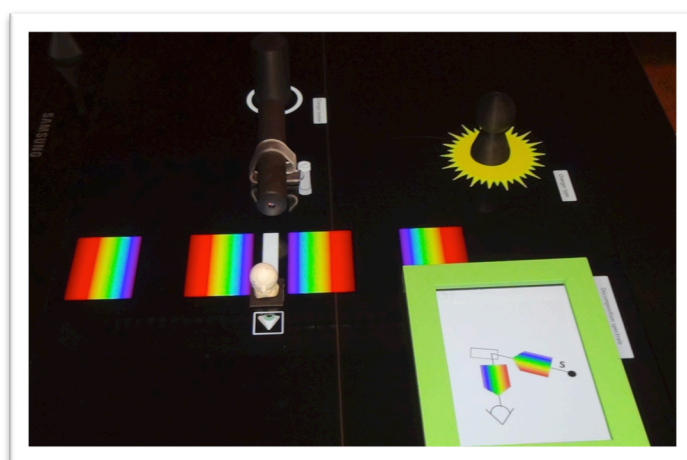
<sup>105</sup> Nous avons fait le choix d'un modèle scolaire, au sens où il s'agit de proposer une représentation des lumières, cohérente avec les représentations en optique géométrique (flèches), mais donnant à voir (dans les flèches) les spectres des lumières utilisées.

<sup>106</sup> Des menus contextuels sont associés aux objets afin de préciser ce qu'ils représentent précisément. Un objet spécifique est associé par défaut, par exemple pour la source de lumière, c'est le soleil (lumière blanche naturelle).



**Figure 80: la table avec les objets tangibles : ces objets sont tagués pour être reconnus par la table. Un même objet tangible peut être générique (il représente un objet réel à choisir dans un menu) ou spécifique (associé à un seul objet réel)**

Dans un deuxième temps, le groupe a défini l’affichage des niveaux de représentation sur la table. Pour aider à l’articulation des niveaux de modélisation, les dessins de la manipulation s’affichent au fur et à mesure que les élèves disposent les objets sur la table (les dessins apparaissent sous les objets tangibles). Lorsqu’ils posent le spectroscopie correctement (sur le segment de lumière – œil, dans le bon sens), apparaît une fenêtre « observation », avec les différents ordres de spectres observés). L’enseignant distribue alors un cadre tangible qui, posé sur la table, fournit la représentation de la situation dans les termes du modèle (Figure 81). Toute modification de la position des objets tangibles provoque en temps réel une modification de la situation représentée dans le cadre « modèle ».



**Figure 81: lorsque les objets sont disposés sur la table, ils sont reconnus et des comportements sont représentés : lumière, spectre de la lumière observée. A l’intérieur du cadre vert, la représentation associée au modèle choisi (ici, la décomposition spectrale)**

Les choix de développement et de scénarisation des activités au sein de ce projet, associés aux possibilités offertes par les technologies à disposition ont pour objectif d'aider à l'articulation des niveaux de modélisation en les affichant sur une même surface et en modifiant en temps réel la représentation schématisée (au niveau du modèle physique) de la représentation des objets (objets tangibles et dessins, au niveau des objets et événements). A travers ces choix, nous donnons à voir aux élèves comment la modification de la situation « réelle » (les objets tangibles) se traduit par une modification au niveau de la représentation sémiotique du modèle (dans le cadre vert). Les élèves doivent alors chercher les explications à un phénomène, soit dans la disposition des objets sur la table, soit dans leur représentation schématisée au niveau du modèle.

De nombreuses questions seraient à investiguer au cours de prochaines recherches :

1. Quelles sont les caractéristiques du discours de l'enseignant pour passer du niveau des objets/événements à celui des théories et modèles ? Sur quels éléments s'appuie-t-il pour aider les élèves à articuler ces deux niveaux ?
2. La disposition simultanée de plusieurs représentations sémiotiques associées à des niveaux de modélisation évite-t-elle des fusions entre ces niveaux ? ces niveaux sont-ils spontanément distingués par les élèves ?
3. Comment les élèves s'emparent-ils des possibilités d'articulation des différents niveaux de représentations ?
4. Quels sont les représentations sémiotiques et les niveaux de modélisations mis en œuvre par les élèves pour expliquer un phénomène nouveau ?

Les phases de pré-test au sein du groupe donnent des éléments de réponse à ces questions, notamment concernant les caractéristiques des discours d'accompagnement de l'enseignant et le rôle des dessins des objets. Il faut maintenant étudier comment ces discours s'ajustent en fonction des activités des élèves en classe. Des enregistrements audio ou vidéo de la conception collaborative des séances d'enseignement ont été faits. Les enregistrements vidéo des séances en classe sont en cours. Les analyses porteront à la fois sur des aspects ergonomiques (thèse de Cedric Knibbe, CEA) et sur des aspects didactiques, en prenant appui sur le cadre épistémo-sémiotique.

## 2.2 Les incitations à l'action

Ainsi que je l'ai présenté au fil de ma note de synthèse, tous les projets de recherche auxquels j'ai contribué depuis 1994 sont caractérisés par des interactions fortes avec le terrain, qu'il s'agisse de recherche-action, de recherche-développement, de Design-Based Research, ou plus récemment de recherches sur des pratiques ordinaires. J'ai ainsi observé, analysé des pratiques d'enseignement des sciences au lycée, puis au collège, et depuis, 2011 à l'école primaire. Outre les spécificités des objectifs de l'enseignement des sciences à chacun de ces niveaux, à la formation des enseignants, la comparaison des pratiques enseignantes fait rapidement apparaître des cultures variées sur la manière dont les enseignants « mettent les élèves au travail ». Cette mise au travail est habituellement qualifiée de consignes, instructions, tâches, conseils, recommandations... « *Au-delà des seuls actes de discours engageants directifs<sup>107</sup>, le professeur parle pour faire agir les élèves. Même lorsqu'il ne donne pas directement de direction de travail aux élèves, le système d'attentes qui lie ceux-ci au professeur, système produit par les formes d'interactions didactiques, engage les élèves à interpréter les paroles professorales à l'aune de ce qu'ils devront (en) faire* » (Sensevy & Quilio, 2002, p. 50). Le contrat didactique, constitué des attentes réciproques des interactants en

---

<sup>107</sup> Ces discours directifs sont explicitement orientés vers une action immédiate.

termes de savoir, surdétermine donc les interactions, et engendre des positions spécifiques du professeur et des élèves par rapport au savoir. Ces positions et leur évolution ont été au cœur de la thèse de Pierre Schramm (2013) que j'ai co-encadrée<sup>108</sup>. Dans sa thèse, Pierre Schramm a notamment montré que l'introduction de nouveaux éléments de savoirs par l'enseignant était assujettie à des positions (acte-parole, par exemple : question ou affirmation) prises au préalable par les élèves (Schramm & al., 2011).

A la lumière de la discussion de mes résultats au chapitre précédent, je souhaite étudier les différences de pratiques observées autour des consignes fournies au primaire et au secondaire pour faire agir les élèves, ce que j'ai présenté au chapitre précédent comme les textes d'incitation à l'action (Adam, 2001a ; 2001b). En effet, des différences notables concernant les supports ainsi que leur mode de présentation aux élèves sont apparues selon les niveaux d'enseignement<sup>109</sup>.

Au collège et au lycée, les consignes sont le plus souvent fournies sous forme écrite, (texte photocopié et distribué aux élèves, plus rarement consigne écrite au tableau ou vidéoprojetée). Au collège, les questions à traiter et donc les consignes, ont été élaborées par les enseignants, préalablement à la séance, sur la base des contenus en termes de connaissances visées figurant dans les programmes. Les consignes écrites sont rarement adaptées en cours de séance.

A l'école primaire, il s'agit davantage de consignes orales, parfois partiellement recopiées au tableau, qui s'appuient sur les formulations des élèves. Elles sont progressivement inscrites au tableau en fonction de l'avancement dans la démarche programmée par l'enseignant. Une interprétation possible à la fragmentation de la consigne, issue de la thèse en cours de Géraldine Boivin-Delpieu, tient à la volonté des enseignants à s'appuyer sur les idées préalables des élèves (Figure 82), conformément aux instructions officielles sur la démarche d'investigation.



**Figure 82: les questions à traiter sont inscrites au tableau après discussion avec les élèves**

Outre la forme du support et le mode d'élaboration de la consigne donnée aux élèves, le choix de l'oral ou de l'écrit implique une visibilité différente de la démarche suivie. Si le support écrit fournit aux élèves l'intégralité du déroulement de la séance, ce n'est pas le cas quand la consigne est donnée à l'oral ou écrite au tableau, puisque dans ce dernier cas, les instructions sont fournies au fur et à mesure des réponses apportées par les élèves.

<sup>108</sup> Il s'agissait d'une thèse en co-tutelle avec l'Université de Warwick (Faculty of Education, Great Britain), dont le co-encadrant a été initialement Peter Johnston-Wilder, puis Michael Hammond.

<sup>109</sup> Les observations que je rapporte n'ont pas valeur de généralité : si des différences de modalités de passation de consignes ont été observées, il conviendrait de voir en quoi ces modalités ont un caractère de généralité pour chaque niveau d'enseignement considéré.

J'ai montré au fil de mes recherches que les représentations sémiotiques à l'oral pouvaient être enrichies de gestes, donnant des informations sur les aspects dynamiques à prendre en considération. Ces aspects dynamiques sont difficiles à représenter à l'écrit. Ainsi, les modalités de présentation des consignes peuvent influencer les niveaux de modélisation fournis aux élèves et ensuite mis en œuvre. De plus, en morcelant la consigne lors de sa passation à l'oral, il sera difficile, par exemple lors de la présentation de la situation expérimentale, de faire apparaître explicitement le modèle sollicité pour expliquer les phénomènes. La démarche globale ne sera pas nécessairement immédiatement accessible aux élèves, ce qui ne signifie pas qu'elle ne le sera jamais, l'enseignant fournissant une trace écrite à conserver en fin de séquence (ou à la fin de chaque séance). Or, on a vu au chapitre 6 (paragraphe 3.2.1, p.144) que les élèves traitent l'information en fonction du niveau de modélisation en jeu dans la consigne. Il faut donc regarder ce qui, dans les consignes fournies aux élèves, leur donne accès au modèle physique pour expliquer, prédire les phénomènes. Il ne s'agira pas dans cette recherche de produire une analyse de bonnes pratiques autour de l'incitation à l'action, mais plus de montrer quelles sont les contributions spécifiques des incitations à l'action orale et écrite sur les activités de modélisation. Les recherches porteraient sur les questions suivantes :

- Quelles sont les informations sur les niveaux de modélisation usuellement apportées par les consignes orales et par les consignes écrites ?
- Quels sont les registres sémiotiques associés à ces niveaux de modélisation ?
- Comment l'enseignant combine-t-il les niveaux de modélisation et les registres sémiotiques associés au primaire, au collège ?

Ces questions sont à mettre en relation avec les résultats obtenus sur les modèles implicites en jeu dans les reformulations multimodales des enseignants. Il s'agira de comparer comment les éléments des modèles enseignés sont peu à peu introduits au primaire et au collège, en relation avec les objectifs d'enseignement. Ainsi, d'autres questions portant sur les pratiques d'enseignement et d'étude pourront être traitées :

- Comment l'enseignant s'appuie-t-il sur les idées préalables ou les précédentes productions d'élèves, pour les aider à s'appuyer sur les éléments des modèles en jeu pour interpréter prédire les événements ?
- Qu'est-ce qui légitime, parmi les éléments introduits par l'enseignant, le recours des élèves à des éléments du modèle, à des objets et des événements présents ou évoqués, et quelles sont les représentations pertinentes pour traiter ces niveaux de modélisation ?

Les analyses porteront sur les incitations à l'action de l'enseignant, la manière dont les élèves s'emparent des informations pour produire une réponse et les reformulations successives de la consigne par l'enseignant.

### 3 Synthèse des perspectives ouvertes par les CÉS

Au cours de ces deux derniers chapitres, j'ai ouvert des pistes de recherche, de nouveaux objets à étudier, ainsi que des hypothèses, émergeant des résultats obtenus, et qui seraient à conforter lors de prochains projets. Le Tableau 13 en présente une synthèse organisée en thématiques. Les nouveaux objets de recherche sont organisés en trois grandes thématiques :

- les articulations entre le discours de consignes et les aspects épistémico-sémiotiques

- les relations entre niveaux de modélisation et représentations sémiotiques mises en jeu dans l'enseignement et l'étude
- les caractéristiques épistémo-sémiotiques des ressources des enseignants et liens avec les documents construits pour élèves.

Certains de ces objets de recherche sont d'ores et déjà intégrés à des projets en cours, d'autres seront proposés comme questions à étudier au cours de masters recherche ou de thèses de doctorat.

Les hypothèses à conforter concernent soit les registres sémiotiques qui se sont révélés des aides ou des freins à l'étude, soit les significations des représentations sémiotiques, des modèles et de leurs relations. Ces hypothèses seront intégrées et mises à l'épreuve lors de futurs projets de recherche.

**Tableau 13: synthèse des objets de recherches et hypothèses à conforter**

| Les nouveaux objets de recherche                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Les hypothèses à conforter                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Les articulations entre discours de consigne et aspects épistémo-sémiotiques</b></p> <p>Quels sont les représentations sémiotiques et niveaux de modélisation associés dans les consignes orales et par les consignes écrites ?</p> <p>Quelles sont, en termes de niveaux de modélisation et de représentations sémiotiques, les caractéristiques des productions des élèves qui conduisent l'enseignant à renégocier la consigne ?</p> <p>En quoi la dynamique du discours de consigne prend en charge les activités de modélisation à travers les registres sémiotiques ?</p> <p>Comment le discours de consigne peut-il aider à l'articulation des niveaux de modélisation ?</p> <p><b>Les relations entre niveaux de modélisation et représentations sémiotiques mises en jeu dans l'enseignement et l'étude</b></p> <p>Lors de l'enseignement d'un modèle, quelles sont les règles d'utilisation des représentations sémiotiques à expliciter <i>a minima</i> de manière à ce que ces représentations sémiotiques soient associées à ce modèle physique ?</p> <p>Quels sont registres sémiotiques spontanément associés par les élèves et par les enseignants aux niveaux de modélisation, et utilisés pour articuler les niveaux de modélisation ?</p> <p>Comment les enseignants de primaire et de collège combinent les niveaux de modélisation et les registres sémiotiques associés ?</p> <p>Est-ce que la mise à disposition simultanée de représentations sémiotiques spécifiques à des niveaux de modélisation évite des fusions entre ces niveaux ? Est-ce que cela facilite la distinction des niveaux de modélisation par les élèves ?</p> <p>Quels sont les représentations sémiotiques et niveaux de modélisation utilisés par les élèves au cours de l'étude en</p> | <p><b>Les registres sémiotiques comme aides ou freins à l'étude</b></p> <p>Le registre des schémas est une aide pour articuler le modèle et les objets et événements.</p> <p>Le registre des tableaux est une aide à la conversion sans perte de signification des valeurs associées à la grandeur mesurée.</p> <p>Les gestes liés à la manipulation (expérience, mime...) sont nécessaires uniquement lorsque les connaissances des élèves ne sont pas en accord avec le savoir académique.</p> <p>Le passage du registre des tableaux ou des écritures symboliques au registre des graphes constitue un obstacle à la compréhension du modèle physique.</p> <p>La continuité dans l'élaboration d'un modèle (au fil des séances) peut être assurée par la modalité sémiotique « geste » (par exemple : l'interrupteur mimé par la position des bras).</p> <p><b>Les significations des représentations sémiotiques, des modèles et de leurs relations</b></p> <p>Les élèves attribuent au registre sémiotique des propriétés du modèle au sein duquel ces registres ont été introduits.</p> <p>Les élèves attribuent au modèle des propriétés liées au domaine de la physique dans lequel ils ont été introduits.</p> <p>Dans les deux hypothèses précédentes, il conviendrait de préciser si les propriétés sont attribuées de manière définitive, durable ou momentanée.</p> <p>La cohérence durable d'un faisceau sémiotique est la marque de la conformité des connaissances des élèves avec le savoir académique.</p> <p>Lors de l'élaboration des critères d'analyse, j'avais fait l'hypothèse que la mesure était associée au monde des objets et événements, les élèves le considérant comme une observable. Les résultats révèlent que ce rattachement dépendrait du niveau d'enseignement ce qui conduit à faire l'hypothèse que cette association évolue au cours de</p> |



fonction des niveaux d'enseignement ?

Les articulations faites par les élèves entre les niveaux de modélisations sont-elles spécifiques des représentations sémiotiques ?

**Les caractéristiques épistémo-sémiotiques des ressources des enseignants et leurs liens avec les documents construits pour élèves.**

Les ressources utilisées par les enseignants pour construire un cours obéissent-elles à des contraintes liées aux niveaux de modélisation explicites, aux représentations sémiotiques utilisées ?

En quoi les caractéristiques des ressources utilisées (en termes de niveaux de modélisation et de représentations sémiotiques) par les enseignants pour préparer un cours modifient les documents élaborés à destination des élèves ?

l'étude, la mesure relevant *in fine* du monde des théories et modèles.

La relation entre une représentation sémiotique et un niveau de modélisation, et donc la signification des représentations sémiotiques, évolue en fonction du niveau d'enseignement.

## 4 Implications sur les méthodologies

Au cours de mes recherches, les analyses conduites avec le cadre épistémo-sémiotique se sont appuyées sur des méthodologies de recherche concernant à la fois les contextes de travail (groupes collaboratifs permettant à des chercheurs de collaborer avec des enseignants), et les données analysées. Je précise ici brièvement des éléments de réflexion sur ces méthodologies.

### 4.1 Les recherches collaboratives

Cette note de synthèse fut l'occasion de caractériser mes recherches collaboratives et de préciser la méthodologie d'élaboration des séquences d'enseignement et le contexte d'évolution de mon cadre épistémo-sémiotique. Les groupes collaboratifs DBR auxquels j'ai participé ou que j'ai animés ne sont pas qualifiables *d'équipes de recherches plurielles* (Orange-Ravachol, 2010), car les rôles des participants étaient, sinon contractuels, au moins explicites dès la mise en place des réunions de travail. Le positionnement de la plupart de mes recherches dans le cadre de la Design-Based Research ne m'a pas empêché de mettre à l'épreuve ce même cadre dans d'autres types de projets, de recherche-action, de recherche pluridisciplinaire par exemple, voire actuellement de recherche-développement. Ainsi, le projet de recherche développement visant à développer des applications sur les tables tactiles avec des objets tangibles bénéficie largement des productions élaborées dans le contexte des projets de type Design-Based Research. L'évolution du cadre d'analyse épistémo-sémiotique fut certainement facilitée par la méthodologie DBR, confrontant les résultats de la recherche à une diversité de pratiques et de contextes d'enseignement. C'est surtout sa pertinence pour la conception de séquences d'enseignement qui a bénéficié de cette méthodologie de recherche. Il est toutefois à noter que des collaborations étroites avec les praticiens lors de la conception des séquences prenant appui sur les résultats issus de mes recherches contribuent à mettre en évidence les aspects de la recherche utiles à la formation initiale ou continue des enseignants. Il serait utile d'étudier comment les enseignants des groupes collaboratifs DBR s'emparent progressivement des composantes du cadre épistémo-sémiotique, les font évoluer vers des outils utilisables de façon autonome pour concevoir d'autres séquences d'enseignement. Des approches issues de la didactique professionnelle nourriraient ce type de recherche.

J'envisage de poursuivre la réflexion que j'ai engagée sur les recherches collaboratives, en lien avec les enjeux et objectifs des recherches. Au sein de mon équipe de recherche actuelle S2HEP, la proximité avec des chercheurs en sciences sociales intervenant dans la faculté de médecine est l'occasion de discuter les méthodologies utilisées dans nos domaines de recherche (didactique des sciences, anthropologie du soin notamment). Début 2015, j'ai défini, conjointement avec des chercheurs en sociologie et en anthropologie du soin<sup>110</sup> l'organisation d'ateliers dont l'objectif sera de caractériser les situations d'interactions, par exemple entre patients et soignants, entre élèves et enseignants de manière à mettre en évidence :

- les postures des chercheurs et des praticiens : modalités de participation, d'observation ;
- les rôles des acteurs au cours des interactions étudiées : le praticien comme chercheur dans les analyses, le chercheur ou le praticien comme formateur ;
- les objectifs de la méthodologie mise en œuvre au cours de la recherche : réflexion sur les représentations, l'action, le produit au sens de résultat voire, d'effet produit, la formation ;
- les outils pour le recueil des données : récit d'expérience, entretien d'explicitation, récit de vie, entretien semi-directif, analyse de discours en situation ordinaire, auto-confrontation ;
- les outils pour l'analyse : analyse manuelle, logiciels éventuels.

Il semble en effet que la comparaison des méthodologies dans nos différents domaines de recherche nous donnera à étudier les rapports entre le vécu et l'information (selon la terminologie utilisée dans les métiers de la santé) ou la pratique et les contenus (pour les métiers de l'éducation), et contribuera à une meilleure connaissance des outils dont chacun se dote pour étudier ces rapports, et envisager leur pertinence potentielle pour d'autres recherches. Les finalités des projets dans lesquels sont mises en œuvre ces méthodologies seront également discutées au regard de leur intérêt pour les communautés de recherche et de praticiens.

## 4.2 Étudier la complexité des pratiques d'étude et d'enseignement

Dans mes recherches, les données associées à l'utilisation de mon cadre épistémico-sémiotique pour l'analyse des pratiques d'étude et d'enseignement sont des données vidéo. Actuellement, de nombreux débats animent la communauté internationale de recherche sur l'éducation scientifique concernant la possibilité d'étudier la complexité des situations éducatives à l'aide de la vidéo. Le Special Interest Group « *Video-based research of teaching and learning processes* »<sup>111</sup> de l'association ESERA en est le principal écho. Il paraît aujourd'hui évident que nulle technique, ni même combinaison de techniques, ne peut retracer la complexité des situations d'enseignement, cette complexité étant inhérente à des événements diachroniques, synchroniques, dont les liens de cause à effet dépendent de facteurs qu'il n'est pas toujours évident ou possible d'identifier.

Cette impossibilité à intégrer tous les éléments qui entrent en jeu dans les pratiques d'enseignement et d'étude n'empêche pas d'étudier les interactions en classe et les productions des élèves en lien avec les activités de représentation sémiotique et de modélisation. Il ressort de mes recherches qu'une bonne connaissance du système éducatif au moins du point de vue des savoirs enseignés dans les différentes disciplines participe à la compréhension des activités des élèves du point de vue des savoirs. Ainsi, les interactions avec des chercheurs en didactique des mathématiques notamment m'ont donné à voir les

---

<sup>110</sup> Jérôme Goffette, Ronald Guilloux, Evelyne Lasserre, Muriel Pommier.

<sup>111</sup> Ce SIG est coordonné par Andrée Tiberghien, Patrice Venturini et Claudia Von Aufschnaiter.

connaissances embarquées dans les représentations sémiotiques. L'analyse des programmes d'autres disciplines (arts plastiques par exemple) éclaire la signification des représentations sémiotiques utilisées en lien avec des modèles préalablement enseignés. Ainsi, les interactions avec les enseignants, y compris d'autres disciplines, contribuent à donner du sens aux représentations sémiotiques, à leur portée, aux règles à respecter pour les mettre en œuvre. Des collaborations avec des chercheurs en sciences du langage émergent de nouveaux questionnements associés à des méthodologies sur les pratiques d'étude et d'enseignement, liés par exemple aux reformulations multimodales. Ces collaborations m'ont incitée à expliciter les données requises pour analyser les interactions en classe sur la base du cadre épistémo-sémiotique. Il me semble désormais envisageable de proposer des pistes sur l'organisation des terrains d'études pour étudier simultanément les pratiques d'études et d'enseignement sur la base du cadre épistémo-sémiotique.

Outre la réflexion sur les prises de données et la formalisation des méthodologies associées, toujours partielles et partiales, cette synthèse de mes recherches m'encourage à poursuivre mes collaborations, pour étudier les corpus collectés avec des regards issus d'autres disciplines scolaires, ou, comme dans le projet *Productive Multivocality*, à croiser les approches théoriques de différentes communautés de recherches afin de donner à voir, au-delà de la communauté de la didactique des sciences (*Science Education*) ce qui fait l'originalité, la spécificité et donc les apports essentiels des recherches en didactique de la physique pour comprendre les pratiques d'enseignement et d'étude de cette discipline.

# Bibliographie

---

Adam, J.-M. (2001a). Types de textes ou genres de discours ? Comment classer les textes qui disent de et comment faire ? *Langages*, 141, 10-27.

Adam, J.-M. (2001b). Entre conseil et consigne : les genres de l'incitation à l'action. *Pratiques*, 111-112, 7-38.

Ainsworth, S. (2006) DeFT: A conceptual framework for learning with multiple representations *Learning and Instruction*, 16(3), 183-198.

Airey, J., & Linder, C. (2009). A disciplinary discourse perspective on university science learning: Achieving fluency in a critical constellation of modes. *Journal of Research in Science Teaching*. 46(1), 27-49.

Ainsworth, S., Prain, V., & Tytler, R. (2011). Drawing to learn in science. *Science*, 333(6046), 1096-1097.

Ainsworth, S., & VanLabeke, N. (2004). Multiple forms of dynamic representation. *Learning and Instruction*, 14(3), 241-255.

Aldon, G., & Bécu-Robinault, K. (2013). Élaboration de règles d'utilisation de représentations par des élèves de SEGPA lors d'activités de modélisations des états de l'eau. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 8, 23-46.

Alibali, M., Bassok, M., Solomon, K., Syc, S., & Goldin-Meadow, S. (1999). Illuminating mental representations through speech and gesture. *Psychological Science*, 10(4), 327-333.

Alibali, M., & Nathan, M. (2012). Embodiment in mathematics teaching and learning: evidence from learners' and teachers' gestures. *The Journal of the Learning Sciences*, 21(2), 1-40.

Allal, L. (1993). Régulations métacognitives : quelle place pour l'élève dans l'évaluation formative. In L. Allal, D. Bain & P. Perrenoud, *Évaluation formative et didactique du français* (p. 81-98). Neuchâtel et Paris, Delachaux et Niestlé.

Amade-Escot, C., & Venturini, P. (2009). Le milieu didactique : d'une étude empirique en contexte difficile à une réflexion sur le concept. *Education et Didactique*, 3(1), 7-43.

Amade-Escot, C., & Venturini, P. (2010). Conditions fostering productive disciplinary engagement during a regular physics lesson in a depressed area school. Paper published in *13th biennial conference EARLI 2009*. Amsterdam, The Netherlands.

Amiel, T., & Reeves, T. (2008). Design-Based Research and Educational Technology: Rethinking Technology and the Research Agenda. *Educational Technology & Society*, 11 (4), 29-40.

Apotheloz, D. (2001). Les formulations collaboratives du texte dans une rédaction conversationnelle : modes d'expansion syntaxique, techniques métalangagières, grandeurs discursives manipulées, etc. In M.-M. de Gaulmyn, R. Bouchard & A. Rabatel (Eds), *Le processus rédactionnel. Ecrire à plusieurs voix* (p. 49-66). Paris : L'Harmattan.

- Artigue, M. (1996). Ingénierie didactique. In J. Brun (Ed.), *Didactique des mathématiques* (p. 243-274). Lausanne, Paris : Delachaux et Niestle.
- Arzarello, F. (2006). Semiosis as a Multimodal Process. *Relime*, Numero Especial, 267-299.
- Arzarello, F. & Paola, D. (2007). Semiotic game : the role of the teacher. In J. Woo, H. Lew, K. Park, & D. Seo (Eds.), *Proceedings of the 31st Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education* (p. 17-24). Seoul: PME, Vol. 2.
- Arzarello, F., Paola, D., Robutti, O. & Sabena C. (2009). Gestures as semiotic resources in the mathematics classroom. *Educational Studies in Mathematics*, 70, 97-109.
- Astolfi, J.-P. (1993). Trois paradigmes pour les recherches en didactique. *Revue française de pédagogie*, 103, 5-18.
- Bachelard, G. (1938). La Formation de l'esprit scientifique Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective. Paris : Éditions Vrin.
- Bachelard, S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre & M. Thellier (Eds.), *Elaboration et justification des modèles* (p. 4-18). Paris : Maloine.
- Badreddine, Z. (2009). Etude des décisions chronogénétiques des enseignants dans l'enseignement de la physique au collège : une étude de cas au Liban. Thèse de doctorat. Université Lyon II, Université Libanaise : Beyrouth.
- Baldy, E., Dusseau, J.-M., & Durand-Guerrier, V. (2007). Mathématiques et physique en classe de troisième : l'exemple de la proportionnalité. *Repères – IREM*, 66, 73-82.
- Barbier, J.-M. (1996). *Savoirs théoriques et savoirs d'action*. Paris : PUF.
- Barlet, R., & Plouin, D. (1997). La dualité microscopique-macroscopique un obstacle sous-jacent aux difficultés en chimie dans l'enseignement universitaire. *Aster*, 25, 143-174.
- Bautier, E., & Goigoux, R. (2004). Difficultés d'apprentissage, processus de secondarisation et pratiques enseignantes : une hypothèse relationnelle. *Revue Française de Pédagogie*, 148, 89-100.
- Bécu-Robinault, K. (1997a). Rôle de l'expérience en classe de physique dans l'acquisition des connaissances sur les phénomènes énergétiques. Thèse de Doctorat. Université Claude Bernard - Lyon 1.
- Bécu-Robinault, K. (1997b). Expérience et activités de modélisation de l'apprenant : introduction expérimentale du concept de puissance. *Didaskalia*, 11, 7-37.
- Bécu-Robinault, K. (2001). Influence of computer-mediated communication on cognitive activities of students during labwork. In *Proceedings of the Third International Conference on Science Education Research in the Knowledge Based Society* (p. 597-599). Thessalonique, 21-25 Août 2001.
- Bécu-Robinault, K. (2002). Modelling activities of students during a traditional labwork. In H. Niedderer & D. Psillos (Eds), *Teaching and learning in the science laboratory* (p. 51-64). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publisher.

Bécu-Robinault, K. (2004). Raisonnements des élèves et sciences physiques. In E. Gentaz & P. Dessus (Eds), *Comprendre les apprentissages : sciences cognitives et éducation* (p. 117-132). Paris : Dunod.

Bécu-Robinault, K. (2007a). Modélisation et investigation autour d'une séquence d'électrocinétique : introduction d'une analogie pour expliquer. In L. Morge & J.-M. Boilevin (Eds), *Séquences d'investigation en physique-chimie* (p. 117-129). CRDP Auvergne : Scérén.

Bécu-Robinault, K. (2007b). Implementing a modelling analogy in a teaching sequence on electric circuits. In symposium "designing, implementing and evaluating science teaching learning sequences: theoretical and empirical developments", *European Science Education Association Conference (ESERA) 2007*, Malmo, Sweden, 21-25 Aug 2007.

Bécu-Robinault, K. (2007). Connaissances mobilisées pour préparer un cours de sciences physiques. *Aster*, 45, 165-188.

Bécu-Robinault, K. (2009). Proposition pour une autoévaluation des compétences en physique. Communication présentée au Colloque international Culture commune socle commun, INRP, Lyon 19-20 novembre 2009.

Bécu-Robinault, K., & Buty, C. (2007). Utilisation d'une analogie pour enseigner l'électrocinétique en cinquième au collège. 5èmes rencontres de l'ARDIST (p. 31-40), La Grande Motte, 17-19 Octobre 2007.

Bécu-Robinault, K., Buty C., & Gaidioz, P. (2006a). Démarche d'investigation et introduction d'un modèle électrocinétique en classe de cinquième. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 886, 1-10.

Bécu-Robinault, K., Buty C., Gaidioz, P. (2006b). Utilisation de l'expérience de l'enseignant en formation continue. Communication présentée à la 8<sup>ième</sup> biennale de l'éducation et de la formation, INRP, p. 381.

Bécu-Robinault, K., & Gelas, D. (2014). Des modèles pour enseigner les compétences. In D. Courtillot & E. Chevigny (Eds.) *Sciences et compétences, pratiques au collège et au lycée* (p. 85-89). Montpellier: CRDP.

Bécu-Robinault, K., & Gobara, S. (2010). Visual arts and physics models in competition within an ICT-based activity : color as matter or color as light ? Communication présentée à *Socio-cultural and Human Values in Science and Technology Education* (p. 156-166). XIV IOSTE Symposium, Bled, Slovenia, June 13- 18.

Bécu-Robinault, K., & Mercier-Dequidt, C. (2012). Des prescriptions officielles sur la validation des compétences à une évaluation formative, contribution au symposium « regards croisés sur les référentiels de compétences et leur mise en place », 24<sup>°</sup> colloque de l'ADMEE – Europe, Luxembourg, 11-13 Janvier 2012.

Bécu-Robinault, K, Monod-Ansaldi R., & Le Maréchal, J.-F. (2010) Ways and methods of implementation of computer aided teaching and learning material in science classes. In L. Koistinen, & al. (Eds), *The effective use of computer aided teaching and learning material in science teaching* (p. 91-120). Plovdiv: Plovdiv University Press.

Bécu-Robinault, K., & Lund, K. (2009). La reformulation par l'enseignant. *Actes des 6<sup>èmes</sup> rencontres de l'ARDIST*, Nantes, 14-16 Octobre 2009, en ligne sur <http://www.ardist.org>.



- Bécu-Robinault, K., & Lund, K. (2011). Students' and teachers' coherencies while communicating with multiple sets of signs. Communication at the *9th ESERA Conference*, Lyon, France, September 5th – 9th.
- Bécu-Robinault, K., & Lund, K. (2012). Modèles implicites dans les reformulations multimodales des enseignants. *7ièmes rencontres de l'ARDIST* (p. 393-400), Bordeaux, 14-16 Mars 2012, en ligne sur <http://www.ardist.org>.
- Bécu-Robinault, K., & Tiberghien, A. (1998). Integrating stable experiment in energy teaching. *International Journal of Science Education*, 20(1), 99-114.
- Bednarz, N. (2013). *Recherche collaborative et pratique enseignante: regarder ensemble autrement*. Paris: L'Harmattan, Savoir et Formation.
- Bental, D., Tiberghien, A., Baker, M., & Megalakaki, O. (1995). Analyse et modélisation de l'apprentissage des notions de l'énergie dans l'environnement CHENE. In Guin, D., Nicaud, J-F. & Py, D. (eds.) *Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur*, Tome 2, p. 137 - 148. Paris : Eyrolles.
- Berg, C., Bergendahl, V., Lundberg, B., & Tibell, L. (2003). Benefiting from an open-ended experiment? A comparison of attitudes to, and outcomes of, an expository versus an open-inquiry version of the same experiment. *International Journal of Science Education*, 25(3), 351-372.
- Berthiau, J., & Bertrand, M. (2009). *Du dessin au schéma en électricité en classe de cinquième*. Mémoire Professionnel IUFM, IUFM de Lyon, Université Lyon 1.
- Bertin, J. (1967). *La sémiologie graphique*. Paris: Gauthier-Villars-Mouton.
- Bianchin, A. (2012). Actualité de l'approche de Jacques Bertin dans l'enseignement de la cartographie. *Cartes & géomatique*, 212, 13-20.
- Bisault, J. & Berzin, C (2009). Analyse didactique de l'activité effective des élèves en sciences à l'école primaire. *Éducation et didactique*, 3 (2), 81-103.
- Boilevin, J.-M. (2010) Contribution à la réflexion sur la rénovation de l'enseignement des sciences physiques dans l'enseignement secondaire. Quelques apports de la didactique des sciences. Note de synthèse pour l'Habilitation à diriger des recherches. Université de Provence.
- Boivin-Delpieu, G., Bécu-Robinault, K., & Lautesse, P. (2014a). Primary school teacher's conceptions concerning experimentation in science, a case study in France. In C. Constantinou, N. Papadouris & A. Hadjigeorgiou (Eds), *Science Education Research For Evidence-based Teaching and Coherence in Learning (Proceedings of the ESERA 2013 Conference)*. Part 16, P. Kariotoglou & T. Russell (Co-Eds), p. 5-15. Nicosia, Cyprus: European Science Education Research Association.
- Boivin-Delpieu, G., Bécu-Robinault, K., & Lautesse, P. (2014b). Identification de certains déterminants de l'action du professeur au sein de transaction didactiques: étude de cas: une séquence sur les phases de la Lune au cycle 3. *8ièmes rencontres de l'ARDIST Marseille 2014. Skholé*, 18(2), p. 87-94.
- Boivin-Delpieu, G., & Bécu-Robinault, K. (soumis). Influence des postures épistémologiques sur l'action didactique. Etude de cas de deux séquences sur les phases de la Lune au cycle 3, *RDST*, n°12.
- Bordon, E., & Vaillant, P. (2011). Le statut du signe iconique entre iconicité et intertextualité. *VISIO, revue de l'Association Internationale de Sémiotique Visuelle*, 6(4), 57-74.

- Bravo, B., Pesa, M. (2005). Conceptions de alumnos (14-15 años) de educación general básica sobre la naturaleza y percepción del color. *Investigaciones en Enseñanza de las Ciencias*, 10(3), 337-362.
- Brehelin, D., & Guedj, M. (2007). Le modèle particulière au collège : fluctuations des programmes et apports de l'histoire des sciences. *Didaskalia*, 31, 129-165.
- Bresson, F. (1987). Les fonctions de représentation et de communication. In J. Piaget, P. Mounoud & J.-P. Bronckart (Eds.), *Psychologie* (p. 933-982). Paris: Encyclopédie de la Pléiade.
- Bressoux, P. & Pansu P. (2003). *Quand les enseignants jugent leurs élèves*. Paris: PUF, 2003.
- Bronckart, J.-P. (2005). *Une introduction aux théories de l'action*. Genève : Carnets de la Section des Sciences de l'Education.
- Bronckart, J.-P., & Schneuwly, B. (dir.) (1985) Vygotski aujourd'hui. Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- Brousseau, G. (1990). Le contrat didactique : le milieu. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 9(3), 309-336.
- Brousseau, G. (1998). Théorie des situations didactiques (Textes rassemblés et préparés par N. Balacheff, M. Cooper, R. Sutherland & V. Warfield). Grenoble: La pensée sauvage.
- Brousseau, G. (2004). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble : La pensée sauvage.
- Bru, M. (2002). Savoirs de la recherche et savoirs des praticiens de l'enseignement : jeu de dupes ou rencontre ouverte et constructive ? In M. Bru et J. Donnay , *Recherches, pratiques et savoirs en éducation* (p. 133-154). Bruxelles : De Boeck.
- Bruner, J.-S. (1983). Le rôle de l'interaction de tutelle dans la résolution de problème. In J. S Bruner, *Le développement de l'enfant : Savoir faire savoir dire* (p. 261-280). Paris : PUF.
- Bucheton, D., & Soulé, Y. (2009). Les gestes professionnels et le jeu des postures de l'enseignant dans la classe : un multi-agenda de préoccupations enchâssées. *Éducation et didactique*, 3(3), 29-48.
- Bunge, M. (1983). *Epistémologie*. Paris : Maloine.
- Buty, C., & Bécu-Robinault, K. (2010). Interactions dans des groupes de recherche-développement. Communication présentée au *Colloque international « Spécificités et diversité des interactions didactiques : disciplines, finalités, contextes »*, 24-26 juin 2010, INRP, Lyon, textes des contributions en ligne sur les archives ouvertes HAL.
- Calmettes, B. (2010). Analyse pragmatique de pratiques ordinaires ; rapport pragmatique à l'enseigner. Étude de cas : des enseignants experts en démarche d'investigation, en physique. *Recherches en Didactique des sciences et des Technologies*, 2, 235-272.
- Calmettes, B. (2012) Modélisation pragmatiste de l'action didactique de l'enseignant. Note de synthèse pour l'Habilitation à diriger des recherches. Université Toulouse 2.
- Cantor, G. (1989). The rhetoric of experiment. In Gooding G., Pinch T., Schaffer S. (Eds) *The uses of experiment - Studies in the natural sciences* (p. 159-180). Cambridge : Cambridge University Press.
- Cardinet, J. (1977). La coordination de l'information dans le système éducatif, Document R.77.13. Neuchâtel : IRDP.

- Cauzinille-Marmèche, E., Mathieu, J., & Weil-Barais A. (1985). Raisonnement analogique et résolution de problèmes. *L'Année Psychologique*, 85, 49-72.
- Chaiguerova, L., Zinchenko, Y., & Yvon, F. (2011). Vie et œuvres de L. S. Vygotsky : un parcours vers la psychologie culturelle historique. In Yvon F. et Zinchenko Y. (Eds) *Vygotsky une théorie du développement du développement et de l'éducation : Recueil de textes et commentaires* (p. 25-58). Moscou : Faculté de psychologie de l'Université d'État de Moscou Lomonossov.
- Charlier, E., & Charlier, B. (1998). *La formation au coeur de la pratique, analyse d'une formation continuée d'enseignants*. Paris-Bruxelles, De Boeck Université.
- Charlier, B., & Henri, F. (2007). Le design participatif pour des solutions adaptées à l'activité des communautés de pratique. In *Congrès international AREF 2007*. Strasbourg.
- Chevallard, Y. (1988). The Student-Learner Gap. Communication au troisième colloque international *Theory of Mathematics Education* (Anvers, 11-15 juillet 1988). In A. Vermandel (Ed) *Proceedings of the Third International Conference* (p. 1-6). Université d'Anvers.
- Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique: perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 12(1), 73-112.
- Chevallard, Y. (1995). La fonction professorale : Esquisse d'un modèle didactique. In Noirfalise R. et Perrin-Glorian M-J (ed). *Actes de la 8ème école d'été de didactique des mathématiques*. Saint-Sauves : IREM de Clermont-Ferrand.
- Chi, M., Slotta, J., & de Leeuw, N. (1994). From Things to Processes: A Theory of Conceptual Change for Learning Science Concepts. *Learning and Instruction*, 4(1), 27-43.
- Chomat, A., Larcher, C., & Méheut, M. (1988). Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, 7, 143-184
- Chouinard, M.M., & Clark, E.V. (2003). Adult reformulations of child errors as negative evidence. *Journal of Child Language*, 30, 637-669.
- Clément, E. (2009). La résolution de problème: À la découverte de la flexibilité cognitive. Paris : Armand Colin.
- Closset, J.L. (1989). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 931-950.
- Collet, G. (1996). Apports linguistiques à l'analyse des mécanismes cognitifs de modélisation en sciences physiques. Thèse de Doctorat. Université Lyon 2.
- Collet, G. (2000). Langage et modélisation scientifique : le verbe, levier de l'apprentissage. CNRS éditions.
- Coquidé, M. (1998). Les pratiques expérimentales : propos d'enseignants et conceptions officielles. *Aster*, 26, 9-32.
- Coquidé, M. (2000). *Le rapport expérimental au vivant*. Mémoire d'HDR. Université Paris- Sud. Orsay.
- Coquidé, M., & Le Maréchal, J.-F. (2006). Modélisation et simulation dans l'enseignement scientifique. *Aster*, 43, 1-9.

- Cornu, L., & Vergnion, A. (1992). *La didactique en questions*. Paris: Hachette.
- Cosnier, J. (1996). Les gestes du dialogue, la communication non verbale. *Revue de psychologie de la motivation*, 21, 129-138.
- Cosnier, J., & Vaysse, J. (1997). Sémiotique des gestes communicatifs. In *Nouveaux actes sémiotiques (Geste, cognition et communication)*, 52, 7-28.
- Coutaz, J., Lachenal, C., Bérard, F., & Barralon, N. (2002). Quand les surfaces deviennent interactives...*Les Cahiers du numérique*, 3(4), 101-126.
- Cross, D. (2009). Les connaissances professionnelles de l'enseignant : reconstruction à partir d'un corpus vidéo de situations de classe de chimie. Thèse de Doctorat. Université Lyon 2.
- Cross, D., Veillard, L., Le Maréchal, J.F., & Tiberghien, A. (2009). Analyse de corpus vidéo d'une série d'enseignement : le découpage en thème. In C. Cohen-Azria & N. Sayac (Eds) *Questionner l'implicite, Les méthodes de recherche en didactique, Volume 3* (p. 101-109). Villeneuve d'Ascq : Presses Universitaires du Septentrion.
- D'Amore, B. (2001). Conceptualisation, registres de représentations sémiotiques et noétique: interactions constructivistes dans l'apprentissage des concepts mathématiques et hypothèse sur quelques facteurs inhibant la dévolution. *Scientia Paedagogica Experimentalis*, 38(2), 143-168.
- Danusso, L., Testa, I., & Vicentini, M. (2010). Improving prospective teachers' knowledge about scientific models and modelling: design and evaluation of a teacher education intervention. *International Journal of Science Education*, 32(7), 871-905.
- De Landsheere, G. (1982). *Introduction à la recherche en l'éducation*. Paris, Armand Colin/Bourrelly, 5<sup>ème</sup> édition.
- De Landsheere, G., & Delchambre, A. (1979). *Les comportements non verbaux de l'enseignant : comment les maîtres enseignent II*. Bruxelles : Labor ; Paris : Nathan.
- De Vries, E. (2000). Hypermédias et apprentissage de la physique : une familiarisation avec les termes d'une modélisation ? *Sciences et Techniques Educatives*, 7, 313-332.
- De Vries, E. (2007). *Représentation et technologie en éducation*. Habilitation à diriger des recherches. Université Pierre-Mendès-France.
- Derycke, M. (1994). Le clivage du signe selon E. Benveniste. *Langage et société*, 70, 35-60.
- Desgagné, S. (1997). Le concept de recherche collaborative : l'idée d'un rapprochement entre chercheurs universitaires et praticiens enseignants. *Revue des sciences de l'éducation*, 23(2), 371-393.
- Desgagné, S., & Larouche, H. (2010). Quand la collaboration de recherche sert la légitimation d'un savoir d'expérience. *Recherches en éducation*, Hors série n°1, 7-18.
- Design-Based Research Collective (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational Researcher*, 32(1), 5-8.
- Dillenbourg, P., Baker, M., Blaye, A., & O'Malley, C. (1996). The evolution of research on collaborative learning. In E. Spada & P. Reiman (Eds) *Learning in Humans and Machine: Towards an interdisciplinary learning science* p. (189- 211). Oxford: Elsevier.

- Direction Générale de l'Enseignement Scolaire. (2006) *Le socle commun des connaissances et des compétences*.
- diSessa, A. (2004). Metarepresentation: native competence and targets for instruction. *Cognition and Instruction*, 22(3), 293-331.
- DiSessa, A., & Sherin, B. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191.
- Douady, R. (1994). *Jeux de cadres et dialectique outil-objet*. Thèse d'État, Université Paris VII.
- Drouin, A. -M. (1988). Le modèle en questions. *Aster*, 7, 1-20.
- Dubost, J., & Lévy, A., (2002). Recherche-action et intervention. In J. Barus-Michel & al., *Vocabulaire de psychosociologie ERES « Hors collection »* (p. 391-416). Ramonville: Erès.
- Dufays, J.-L. (2006). Au carrefour de trois méthodologies: une recherche en didactique de la lecture littéraire. In L. Paquay, M. Crahay, & J.-M. De Ketele (Eds.), *L'analyse qualitative en éducation, Pédagogies en développement* (p. 143-164). Bruxelles : De Boeck Université.
- Duhem, P. (1981). *La théorie physique, son objet, sa structure*. Paris : Vrin, Deuxième édition revue et augmentée.
- Duit, R., & Von Rhöneck, C., (1997). Apprendre et comprendre les concepts clés de l'électricité. In A. Tiberghien, E.L. Jossem, J. Barojas (Eds), *Résultats de Recherche en Didactique de la Physique au service de la Formation des Maîtres*. ICPE, <http://sir.univ-lyon2.fr/gric-coast/ICPE/francais/TOC.html>.
- Dupin, J. J., & Johsua, S., (1989). Analogies and "modeling analogies" in Teaching: Some exemples in basic electricity. *Science Education*, 73(2), 207-224.
- Dupin, J.-J., & Johsua, S. (1994). Analogies et enseignement des sciences : une analogie thermique pour l'électricité. *Didaskalia*, 3, 9-26.
- Duru-Bellat M., & Mingat, A. (1997). La constitution de classes de niveau par les collèges : Les effets pervers d'une pratique à visée égalisatrice. *Revue Française de Sociologie*, 38(4), 759-790.
- Duval, R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine*. Berne : Peter Lang.
- Duval, R. (2002). Comment décrire et analyser l'activité mathématique ? Cadres et registres. In *Actes de la Journée en hommage à Régine Douady* (p. 83-105). IREM, Université Paris 7.
- Duval, R. (2007). La conversion des représentations : un des deux processus fondamentaux de la pensée. In J. Baillé (Ed.) *Conversion, du mot au concept* (p. 9-45). Presses universitaires de Grenoble.
- Duval, R. (2009). Sémiosis, pensée humaine et activité mathématique. *Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, 6(11), 126-143.
- Dykstra, D., Boyle, C., & Monarch, I. (1992). Studying conceptual change in learning physics. *Science Education*, 76(6), 615-652.
- Engle, R. A (2011) The productive disciplinary engagement framework: origins, key concepts and developments. In D. Y. Dai (Ed.) *Design research on learning and thinking in educational settings: enhancing intellectual growth and functioning* (p. 161-200). London: Taylor & Francis,.

- Engle, R. A., & Conant, F. C. (2002). Guiding principles for fostering productive disciplinary engagement: Explaining an emergent argument in a community of learners classroom. *Cognition and Instruction*, 20(4), 399-483.
- Engle, R., & Faux, R. (2006). Towards productive disciplinary engagement of prospective teachers in educational psychology: Comparing two methods of case-based instruction. *Teaching Educational Psychology*, 1(2), 1-22.
- Everaert-Desmedt, N. (1990), Le processus interprétatif. Introduction à la sémiotique de Ch. S. Peirce. Liège : Mardaga.
- Fabre, M., & Orange, C. (1997) Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster*, 24, 37-57.
- Feynman, R. (1980). *La nature de la physique*. Paris : Editions du Seuil.
- Filliettaz, L. (2009). Les discours de consignes en formation professionnelle initiale : une approche linguistique et interactionnelle. *Education & Didactique*, 3(1), 91-119.
- Forest, D. (2006). Analyse proxémique d'interactions didactiques. *Carrefour de l'Education*, 21, 73-94.
- Forest, D. (2008). Agencements didactiques : pour une analyse fonctionnelle du comportement non-verbal du professeur. *Revue française de pédagogie*, 165, 77-89.
- Forman, E.A., Venturini, P., & Ford, M.J. (2014). (Guest editors). Challenging the Principles for Fostering Productive Disciplinary Engagement in Science. *International Journal of Educational Research*, Vol. 64.
- Forrest, D., & Whalen, M. (2012). "Cheers for rates of change" — An introductory lab used to relate graphs to physical systems. *The Physics Teacher*, 50, 461-463.
- Fourez, G., & Englebert-Lecomte, V. (1999) Enseigner les démarches scientifiques. *Probio-Revue*, 22(1), 3-15.
- Fourez, G., Englebert-Lecomte, V., & Mathy, P. (1997), *Nos savoirs sur nos savoirs, un lexique d'épistémologie pour l'enseignement*. Bruxelles : De Boeck Université.
- Fredlund, T., Airey, J., & Linder, C. (2012). Exploring the role of physics representations: an illustrative example from students sharing knowledge about refraction. *European Journal of Physics*, 33(3), 657-666
- Gagliardi, M. (1998). Le problème d'une modélisation dynamique de la médiation en sciences expérimentales. In A. Dumas-Carré & A. Weil-Barais (éd.) *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique* (p. 65-79). Paris : Peter Lang.
- Gaidioz, P., & Tiberghien, A. (2003). Un outil d'enseignement privilégiant la modélisation. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 97(850), 71-83.
- Gaidioz, P., Vince, J., & Tiberghien, A. (2004). Aider l'élève à comprendre la physique et son articulation avec la vie quotidienne. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 98(866), 1029-1042.
- Gaidioz, P., Monneret, A., Tiberghien, A., Bécu-Robinault K., Besson, G., Blache, M.-J., Chastan, J.-M., Clavel, C., Colonna, A.-M., Collet, G., Gibert, D., Longère, G., Le Maréchal, J.-F., Strobel M.-P.,



- & Vagnon, H. (1998) *Introduction à l'énergie, Collection Appliquer le programme*. Lyon : Centre Régional de documentation pédagogique de Lyon.
- Gibson, J. (1977). The theory of affordances. In R. Shaw & J. Bransford (Éds.), *Perceiving, acting, and knowing* (p. 67 -83). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Giere, R. (1988). *Explaining science, a cognitive approach*, Chicago : The University of Chicago Press.
- Gilbert, J. (2004). Models and modeling: routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115-130.
- Gilbert, J. K., Boulter, C.J., & Elmer, R. (2000). Positioning Models in Science Education and in Design and Technology Education. In: J.K. Gilbert and C.J. Boulter (eds.), *Developing Models in Science Education* (pp. 3-17). Dordrecht: Kluwer.
- Givry, D., & Roth, W.-M. (2006). Toward a new conception of conceptions: Interplay of talk, gestures, and structures in the setting. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(10), 1086-1109.
- Goffard, M., & Dumas-Carré, A. (1993). Le problème de physique et sa pédagogie. *Aster*, 16, 9-28.
- Goyette, G., & Lessard-Hébert, M. (1987). *La recherche-action : ses fonctions, ses fondements et son instrumentation*. Sainte-Foy : Presses de l'Université du Québec.
- Grandy, R. (1992). Information, observation, and measurement from the viewpoint of a cognitive philosophy of science. In N. Giere (Ed.), *Cognitive models of science* (p. 187-206). Minneapolis : University of Minnesota Press.
- Gold, R. (1958). Roles in Sociological Field Observation. *Social Forces*, 36(3), 217-223.
- Goldin-Meadow, S. (1999). The role of gesture in communication and thinking. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(11), 419-429.
- Goldin-Meadow, S., & Alibali, M. (2013). Gesture's role in speaking, learning, and creating language. *Annual Review of Psychology*, 64, 257-283.
- Goldin-Meadow, S., & Wagner, S. (2005). How our hands help us to learn. *Trends in Cognitive Science*, 9(5), 234-241.
- Goldman, S., & McDermott, R. (2007). Video research in the learning sciences. In R. Goldman, R. Pea, B. Barron & S. Derry (Eds.), *Staying the course with video analysis* (p. 101-113). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Gooding, D., Pinch T., & Schaffer, S. (1989). *The uses of experiment - Studies in the natural sciences*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Goodwin, C. (2000). Action and embodiment within situated human interaction. *Journal of Pragmatics*, 32(10), 1489-1522.
- Gueudet G., & Trouche L. (2008). Du travail documentaire des enseignants : genèses, collectifs, communautés. Le cas des mathématiques. *Education et didactique*, 2(3), 7-33.
- Hackling, M., Murcia, K., & Ibrahim-Didi, K. (2013). Teacher orchestration of multimodal resources to support the construction of an explanation in a Year 4 astronomy topic. *Teaching Science*, 59(1), 7-15.

- Halbwachs, F. (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.
- Hardy, M., Belmont, B., Noël-Hurcaux, E. (2011) *Des recherches-actions pour changer l'école, expériences faites*. Paris : L'Harmattan.
- Henze, I., Van Driel, J., & Verloop, N. (2007). The change of science teachers' personal knowledge about teaching models and modelling in the context of science education reform. *International Journal of Science Education*, 29(15), 1819-1846.
- Hind A., Leach, J., Lewis, J., & Scott, P. (2002). A teaching scheme developed from research evidence on student's learning about electric circuits, téléchargeable à l'adresse suivante : [www.education.leeds.ac.uk/research/cssme/ElecCircuitsScheme.pdf](http://www.education.leeds.ac.uk/research/cssme/ElecCircuitsScheme.pdf)
- Hitt, F. (2004). Les représentations sémiotiques dans l'apprentissage de concepts mathématiques et leur rôle dans une démarche heuristique. *Revue des sciences de l'éducation*, 30(2), 329-354
- Hodson, D. (1990). A critical look at practical work in school science. *School Science Review*, 71(256), 33-40.
- Hodson, D. (1992). In search of a meaningful relationship: An exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science Education*, 14, 541-562.
- Hugon, M., & Siebel, C. (1987). Recherche-Action, Formation : quelle articulation. *Recherche et Formation*, 2(2), 9-20.
- Hulin, M. (1992). *Le mirage et la nécessité, pour une redéfinition de la formation scientifique de base*. Paris : Presses de l'École Normale Supérieure, Palais de la Découverte.
- Johsua, S. (1989). Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, 8, 29-53.
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1988). Ambiguïtés du fonctionnement de l'enseignement de la physique au collège. *Revue française de pédagogie*, 84, 39-44.
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le débat scientifique dans la classe*. Berne : Peter Lang.
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Johsua, S., & Félix, C. (2002). Le travail des élèves à la maison : une analyse didactique en terme de milieu pour l'étude. *Revue Française de Pédagogie*, 141, 89-97.
- Johsua, M.-A., & Johsua, S. (1987). Les fonctions didactiques de l'expérimental dans l'enseignement scientifique (première partie). *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 8(3), 231-266.
- Johsua, M.-A., & Johsua, S. (1988). Les fonctions didactiques de l'expérimental dans l'enseignement scientifique (deuxième partie). *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 9(1), 5-30.
- Justi, R. (2009). Learning how to model in science classroom: key teacher's role in supporting the development of students' modelling skills. *Educación Química*, 20(1), 32-40.

- Justi, R., & Gilbert, J. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387.
- Justi, R., & van Driel, J. (2005). The development of science teachers' knowledge on models and modelling: promoting, characterizing, and understanding the process. *International Journal of Science Education*, 27(5), 549-573.
- Juuti, K., & Lavonen, J. (2006). Design-based research in science education: one step towards methodology. *NorDina : Nordisk tidsskrift i naturfagdidaktikk*, 2, 54-68.
- Kendon, A. (2004). *Gesture: Visible action as utterance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Khanfour-Armalé, R. (2008). Structuration par le professeur des connaissances construites par des élèves ayant travaillé en autonomie lors d'une activité expérimentale de chimie. Thèse de doctorat. Université Lumière Lyon 2.
- Kohl, P., Rosengrant, D., & Finkelstein, N. (2007). Strongly and weakly directed approaches to teaching multiple representation use in physics, *Physical review special topics – Physics Education Research*, 3, 1-10.
- Koumaras, P. (2003). A new hydraulic model for the electric circuit. *School Science Review*, 85(310), 19-23.
- Kozma, R., & Russell, J. (1997). Multimedia and understanding: Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(9), 949– 968.
- Kress, G., Jewitt, C., Ogborn, J., & Tsatsarelis, C. (2001). *Multimodal teaching and learning. The rhetorics of the science classroom*. London and New York : Continuum.
- Kress, G., & Van Leeuwen, T. (2001). *Multimodal Discourse The Modes and Media of Contemporary Communication*. London : Arnold.
- Kuhn, T.S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion, Collection Champs.
- Labudde, P. (2008). Developing and implementing new national standards in science education. In B. Ralle & I. Eilks (Eds), *Promoting successful science education* (p. 63-74). Aachen : Shaker.
- Larcher, C. (1996). La physique et la chimie, sciences de modèles. In J. Toussaint (Ed.), *Didactique appliquée de la physique-chimie* (p. 160-178). Paris : Nathan.
- Larcher, C. (2003). Contribution à la table ronde « cadres théoriques autour de la modélisation ». In V. Albe, C. Orange & L. Simonneaux (Eds.), *Actes des 3èmes rencontres scientifiques de l'ARDIST « Recherches en didactique des sciences et des techniques : Questions en débat »* (p. 305-308). Toulouse : ENFA.
- Larcher, C., Chomat, A., & Méheut, M. (1990). À la recherche d'une stratégie pédagogique pour modéliser la matière dans ses différents états. *Revue Française de Pédagogie*, 93, 51-61.
- Latour, B. (2006). Les vues de l'esprit. Une introduction à l'anthropologie des sciences et des techniques. In *Sociologie de la traduction* (p. 33-70). Textes fondateurs, Presse de l'Ecole des Mines de Paris.
- Leach, J., & Scott, P. (1995). The demands of learning science concepts: issues of theory and practice. *School Science Review*, 76 (277), 47 - 52.

- Leach, J., & Scott, P. (2003). Individual and Sociocultural Views of Learning in Science Education. *Science & Education*, 12(1), 91–113.
- Lemeignan, G., & Weil-Barais, A. (1988). Gestion d'activités de modélisation en classe. *Aster*, 7, 121-141
- Legendre, M.-F. (2008). « La notion de compétence au cœur des réformes curriculaires : effet de mode ou moteur de changement en profondeur ? ». In F. Audigier & M.-F. Legendre, *Compétences et contenus, les curriculums en question* (p. 27-50). Bruxelles : De Boeck.
- Le Maréchal, J.-F., & Bécu-Robinault K. (2006). La simulation en chimie au sein du projet Microméga®. *Aster*, 43, 81-108.
- Lemke, J. (1990). *Talking science: language, learning and values*. Norwood, New Jersey : Ablex Publishing Corporation.
- Lemke, J. (2012). Multimedia and discourse analysis. In J. Gee & M. Handford (Eds.) *The Routledge Handbook of Discourse Analysis* (p. 79-89). New York : Routledge.
- Linder, C. (2013). Disciplinary discourse, representation, and appresentation in the teaching and learning of science. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 1(2), 43-49.
- Liu, M. (1997). Fondements et pratiques de la recherche-action. L'Harmattan.
- Loarer, C. (2002). La rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école primaire, Rapport à monsieur le Ministre de l'Education Nationale.
- Loiselle, J. (2001). La recherche développement en éducation : sa nature et ses caractéristiques. In M. Anadón & M. L'Hostie (Éds.), *Nouvelles dynamiques de recherche en éducation* (p. 77-97). Québec : Presses de l'Université Laval.
- Loiselle, J., & Harvey, S. (2007). La recherche développement en éducation : fondements, apports et limites. *Recherches qualitatives*, 27(1), 40-59.
- Loisy, C., Coquidé, M., Prieur, M., Aldon, G., Bécu-Robinault, K., Dell'Angelo, M., Kahn, S., & Mercier-Dequidt, C. (2014). Evaluation des compétences du Socle commun : tensions et complexités. In C. Dierendonck, E. Loarer & B. Rey (Eds.), *L'évaluation des compétences en milieu scolaire et en milieu professionnel* (p. 257-267). Bruxelles : De Boeck.
- Lund, K., & Bécu-Robinault, K. (2010a). La reformulation multimodale et polysémiotique comme aide à la compréhension de la physique. In A. Rabatel (Ed). *Analyse sémiotique et didactique des reformulations* (p. 191-216). Besançon : Presses universitaires de Franche-Comté.
- Lund, K., & Bécu-Robinault, K. (2010b) Learning physics as coherently packaging multiple sets of signs, in K. Gome, L. Lyons, & J. Radinsky (Eds.) *Learning in the Disciplines: Proceedings of the 9th International Conference of the Learning Sciences (ICLS 2010) - Volume 1, Full Papers* (p. 404-411). Chicago IL, USA: International Society of the Learning Sciences.
- Lund, K., & Bécu-Robinault, K. (2013). Conceptual Change and Sustainable Coherency of Concepts Across Modes of Interaction. In D. Suthers, K. Lund, C. Rose, C. Teplovs & N. Law (Eds) *Productive Multivocality in the Analysis of Group Interactions* (p. 311-330). New York : Springer.

- Magnusson, S., Krajcik, J., & Borko, H. (1999). Nature, sources and development of pedagogical content knowledge for science teaching. In J. Gess-Newsome & N. G. Lederman (Eds.), *Examining pedagogical content knowledge* (p. 95-132). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Malafosse, D., Lerouge, A., & Dusseau, J.-M. (2000). Notions de registre et de cadre de rationalité en inter-didactique des mathématiques et de la physique. *Tréma*, 18, 49-60.
- Margolinas, C. (1992). Eléments pour l'analyse du rôle du maître: les phases de conclusion. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 12(1), 113-158.
- Margolinas, C. (2004). *Points de vue de l'élève et du professeur : Essai de développement de la théorie des situations didactiques*. Habilitation à diriger les recherches en sciences de l'éducation, Université de Provence.
- Martinand, J.-L., & al. (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- Martinand, J. L. (1996). Introduction à la modélisation. In J.-L. Martinand & A. Durey, *Actes du Séminaire de didactique des disciplines technologiques* (p. 7-19), Cachan 1994-1995. Paris : Tour 123.
- Martineau, S. (2005). L'observation en situation : enjeux, possibilités et limites. *Recherches qualitatives*, Hors Série n°2, 5-17.
- Mathé, S., Méheut, M., & De Hosson, C. (2008). Démarche d'investigation au collège : quels enjeux ? *Didaskalia*, 32, 77-116.
- Mc Neill, D. (1992). *Hand and mind ; what gestures reveal about thought*. Chicago: University Press.
- Méheut, M. (1996) Enseignement d'un modèle particulaire cinétique de gaz au collège. Questionnement et simulation. *Didaskalia*, 8, 7-32.
- Méheut, M., & Chomat, A. (1990). Les limites de l'atomisme enfantin ; expérimentation d'une démarche d'élaboration d'un modèle par des élèves de collège. *European Journal of Psychology of Education*, 5, 417-43.
- Mercier, A., Schubauer-Leoni, M., & Sensevy, G. (2002). Vers une didactique comparée. *Revue Française de Pédagogie*, 41, 5-16.
- Mercier, A., & Sensevy, G. (1999). Pourquoi faire encore des mathématiques à l'école *Le Télémaque*, 15, 69-78.
- Mercier-Dequidt, C., & Bécu-Robinault, K. (2014). Une méthode d'évaluation. In D. Courtillot & E. Chevigny (Eds.), *Sciences et compétences, pratiques au collège et au lycée* (p. 144-148). Montpellier: CRDP.
- Mercier-Dequidt, C., & Morge L. (2014). Appropriation, par les élèves de terminale scientifique, d'un dispositif analogique pour la compréhension de l'électricité. In 8ièmes rencontres de l'ARDIST Marseille 2014. *Skholé*, 18(1), 411-422.
- Millar, R., Tiberghien, A. and Le Maréchal, J.-F. (2002). Varieties of labwork: A way of profiling labwork tasks. In Psillos, D. and Niedderer, H. (eds.), *Teaching and Learning in the Science Laboratory*, Dordrecht: Kluwer Academic, p. 9-20.
- Ministère de L'éducation nationale (1992), *Bulletin Officiel spécial de L'Éducation Nationale*, Hors série du 24-09-1992.

- Ministère de L'éducation nationale (2004). Groupe de relecture des programmes du collège, Sous la présidence de Jean-François Bach. Pôle des sciences. Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation Nationale et de la Recherche.
- Ministère de L'Éducation Nationale (2005a), *Bulletin Officiel de L'Éducation Nationale*, 18, Paris. Loi n°2005-380 du 23 avril 2005.
- Ministère de L'Éducation Nationale (2005b), *Bulletin Officiel spécial de L'Éducation Nationale*, Hors série n°5, 25 Aout 2005.
- Ministère de L'Éducation Nationale (2006). *Bulletin Officiel de L'Éducation Nationale*, 29, Paris. Décret du 11 juillet 2006.
- Ministère de L'Éducation Nationale (2007). *Bulletin Officiel de L'Éducation Nationale*, 6, Paris. 19 Avril 2007.
- Ministère de L'Éducation Nationale (2008a). Programmes du collège, programme de l'enseignement de physique-chimie. *Bulletin Officiel spécial de L'Éducation Nationale*, 6, 28 Août 2008.
- Ministère de L'Éducation Nationale (2008b). Programmes du collège, programme de l'enseignement d'arts plastiques. *Bulletin Officiel spécial de L'Éducation Nationale*, 6, 28 Août 2008.
- Ministère de L'Éducation Nationale (2009). Socle commun de connaissances et de compétences, grilles de référence palier 3 - Évaluation en fin de scolarité obligatoire.
- Minsky, M. (1965). *Matter, Mind and Models*. In *Proceedings of IFIP Congress*, May 1965, Volume 1, 45-49.
- Missonier, M.-F., & Closset, J.-L. (2004). Observations de chemins suivis par les élèves dans l'apprentissage des bases de l'électrocinétique. *Didaskalia*, 25, 63-88.
- Morge, L. et Boilevin, J.-M. (2007). *Séquences d'investigation en physique-chimie, Collège, Lycée*. Clermont-Ferrand : CRDP d'Auvergne.
- Morge, L. & Doly, A.-M. (2013). L'enseignement de la notion de modèle. Quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité ? *Spirale – Revue de Recherches en Éducation*, 52, 149-175.
- Mortimer, E., & Scott, P. (2003). *Meaning making in secondary science classrooms*. Maidenhead : Open University Press.
- Mosès, S. (2001). Emile Benveniste et la linguistique du dialogue. *Revue de métaphysique et de morale*, 4(32), 509-525.
- Mulhall, P., McKittrick, B. & Gunstone R. (2001). A perspective on the resolution of confusions in the teaching of electricity. *Research in Science Education*, 31, 4, 575-587.
- Ney, M. (2007). *Modélisation formelle en sciences expérimentales : Problématiques de la transmission*. Note de synthèse pour l'Habilitation à diriger des recherches. Université Claude Bernard, Lyon 1.
- Norman, D. A. (1999). Affordance, Conventions, and Design. *ACM Interactions*, 6, 38-42.
- Nunziati, G. (1990). Pour construire un dispositif d'évaluation formatrice. *Cahiers pédagogiques*, 280, 47-64.



- Orange, C., & Orange-Ravachol, D. (2013). Le concept de représentation en didactique des sciences : sa nécessaire composante épistémologique et ses conséquences. *Recherches en Education*, 17, 46-61.
- Orange-Ravachol, D. (2010). Collaboration chercheur didacticien / enseignant et choix de l'enseignant en situation scolaire : une étude de cas en sciences de la Terre. *Recherches en éducation*, Hors Série n°1, 47- 59.
- Paatz, R., Ryder, J., Schwedes, H., & Scott, P. (2004). A case study analysing the process of analogy-based learning in a teaching unit about simple electric circuit. *International Journal of Science Education*, 26(9), 1065-1085.
- Paty, M. (1994). Mesure expérience et objet théorique en physique. In J.C. Beaune (dir.) *La mesure, instruments et philosophies*. Seyssel : Champ Vallon, Collection Milieux.
- Peraya, D., & Meunier, J.-P. (1999). Vers une sémiotique cognitive. *In Cognito*, 14, 1-16.
- Perrenoud, P. (1997). *Construire des compétences à l'école*. Paris : ESF.
- Perrin-Glorian, M.-J. (1999). Problèmes d'articulation de cadres théoriques : l'exemple du concept de milieu. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 19(3), 279-322.
- Piaget, J. & Garcia, R. (1983). *Psychogenèse et histoire des sciences*. Paris : Flammarion.
- Picavet, E. (1995). *Approches du concret, une introduction à l'épistémologie*. Paris : Ellipses.
- Pickering, A. (1992). Living in the material world. In Gooding G., Pinch T., Schaffer S. (Eds), *The uses of experiment - Studies in the natural sciences* (p. 275-297). Cambridge : Cambridge University Press.
- Planinic, M., Ivanjek, L., Susac, A., & Milin-Sipus, Z. (2013). Comparison of university students' understanding of graphs in different contexts. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 9(2), 3-9
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: towards a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Pozo, J., Gómez, A., & Sanz, A. (1999). When change does not mean replacement : different representations for different contexts. In W. Schnotz, S. Vosniadou, & M. Carretero (Eds) *New perspectives on conceptual change* (p. 161-174). Oxford : Elsevier science.
- Rabatel, A. (2010). Pour une approche intégrée des reformulations pluri-sémiotiques en contexte de formation : apprendre en reformulant et en resémiotisant documents iconiques, gestes et actions. In A. Rabatel (Ed). *Analyse sémiotique et didactique des reformulations* (p. 191-216). Besançon : Presses universitaires de Franche-Comté.
- Radford, L. (2009). Why do gestures matter? Sensuous cognition and the palpability of mathematical meanings. *Educational Studies in Mathematics*, 70, 111-126.
- Radford, L., Bardini, C., & Sabena, C. (2007). Perceiving the general : The Multisemiotic Dimension of Students' Algebraic Activity. *Journal for Research in Mathematics Education*, 38(5), 507-530.
- Radford, L., Edwards, L., & Arzarello, F. (2009). Introduction: beyond words. *Educational Studies in Mathematics*, 70, 91-95.

- Raisky, C. (2001). Référence et système didactique. In A. Terrisse (dir.) *Didactique des disciplines: les références au savoir* (p. 25-47). Bruxelles: De Boeck.
- Rappoport, L. T., & Ashkenazi, G. (2008). Connecting levels of representation: Emergent versus submergent perspective. *International Journal of Science Education*, 30(12), 1585-1603.
- Ratcliffe, M., Bartholomew, H., Hames, V., Hind, A., Leach, J., Millar, R. & Osborne, J. (2004). *Science education practioners' views on research and its influence on their practice*. Evidence-based practice in science education (EPSE) Report, University of York.
- Rivière, V. (2009). L'activité de prescription en contexte didactique : analyse psycho-sociale, sémio-discursive et pragmatique des interactions en classe de langue étrangère et seconde. Thèse de doctorat. Université Paris III – Sorbonne Nouvelle.
- Robardet, G. (1998). La didactique dans la formation des professeurs de sciences physiques face aux représentations sur l'enseignement scientifique. *Aster*, 26, 31-58.
- Robardet, G. (2001). Quelle démarche expérimentale en classe de physique, notion de situation-problème. *Bulletin de l'Union des physiciens*, 95(836), 1173-1190.
- Robardet, G. & Guillaud, J.-C. (1997) *Eléments de didactique des sciences physiques*. Paris : PUF.
- Rosengrant, D., van Heuvelen, A., & Etkina, E. (2009). Do students use and understand free-body diagrams ? *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 5, 1-8.
- Roth, W. (2002). Gestures: Their role in teaching and learning. *Review of Educational Research*, 71, 365–392.
- Roulet, E. (1975). *Ferdinand de Saussure, Cours de linguistique générale*. Paris : Hatier.
- Säljö, R. (1999). Concepts, cognition and discourse : from mental structures to discursive tools. In W. Schnotz, S. Vosniadou & M. Carretero (Eds) *New perspectives on conceptual change* (p. 81–90). Oxford : Elsevier science.
- Sander, E. (2000). *L'analogie, du naïf au créatif : analogie et catégorisation*. Paris : L'harmattan.
- Sandoval, W., & Bell, P. (2004). Design-based research methods for studying learning in context : Introduction. *Educational Psychologist*, 39(4), 199-201.
- Schneuwly, B. (2011). Vygotsky : critique du socioconstructivisme avant la lettre ? In Yvon F. & Zinchenko Y. (Eds) *Vygostky une théorie du développement du développement et de l'éducation : Recueil de textes et commentaires* (p. 338-355). Moscou : Faculté de psychologie de l'Université d'État de Moscou Lomonossov.
- Schön, D. (1993). *Le praticien réflexif. À la recherche du savoir caché dans l'agir professionnel*. Montréal : Éditions Logiques.
- Schramm, P. (2013). Comparative study of in-school learning contexts. Comparison between France and England. Thèse de Doctorat. University of Warwick et Université Lyon 2.
- Schramm, P., Bécu-Robinault, K., & Johnston Wilder, P. (2011) Evolution of positions during a lesson: a case study. Paper presented at the meeting of the 9th ESERA Conference, Lyon, France, September 5th – 9th 2011.

- Schwarz, C., Reiser, B., Davis, B., Kenyon, L., Acher, A., Fortus, D., Schwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Designing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal for Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654.
- Scott, P. (2008). Talking a Way to Understanding in Science Classrooms. In Mercer, N. & Hodgkinson, S. (Eds) *Exploring Talk in School, inspired by the work of Douglas Barnes* (p. 17-36). London: Sage.
- Scott, P., Leach, J., Hind, A., & Lewis, J. (2006). Designing research evidence-informed teaching interventions, in R. Millar, J. Leach, J. Osborne & M. and Ratcliffe (Eds). *Improving Subject Teaching: Lessons from Science Education Research* (p. 60-78). London: Routledge Falmer.
- Scott, P., Mortimer, E., & Aguiar, O. (2006) The tension between authoritative and dialogic discourse: A fundamental characteristic of meaning making interactions in high school science lessons. *Science Education*, 90(4), 605-631.
- Seck, M. (2007). Comparaison des pratiques de classes dans le cas de l'enseignement de l'énergie en première scientifique au Sénégal et en France. Thèse de Doctorat. Université Lyon 2.
- Sensevy, G., & Mercier, A. (Eds). (2007). *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves*. Rennes : PUR.
- Sensevy, G. Quilio, S. (2002). Les discours du professeur. Vers une pragmatique didactique. *Revue Française de Pédagogie*, 141, 47-56.
- Shipstone, D.M., Rhöneck, C. von, Jung, W., Karrqvist, C., Dupin, J.-J., Joshua, S., & Licht, P. (1988). A study of secondary students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10, 303-316.
- Shulman, L. (1986). Those who understand: knowledge growth in teaching. *Educational researcher*, 15(2), 4-14.
- Spada, H. (1994). Conceptual change or multiple representations. *Learning and Instruction*, 4, 113-116.
- Stieff, M. (2011). Improving representational competence using molecular simulations embedded in inquiry activities. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(10), 1137-1158.
- Susman, G., & Evered, R. (1978). An assessment of the scientific merits of action-research. *Administrative science quarterly*, 23(4), 582-603.
- Suthers, D., Lund, K., Rosé, C., Teplovs, C., & Law, N. (2013). *Productive Multivocality in the Analysis of Group Interactions*. New York: Springer.
- Suthers, D., & Medina, R. (2011). Tracing interaction in distributed collaborative learning. In S. Puntambekar, G. Erkens & C. E. Hmelo-Silver (Eds.), *Analyzing Interactions in CSCL: Methods, Approaches and Issues* (p. 341-366). New York: Springer Science+Business Media, LLC.
- Tellier, M. (2008). Dire avec des gestes. *Le français dans le monde - recherches et applications*, 44, 40-50
- Thuillier, P. (1988). Les Jésuites ont-ils été les pionniers de la science moderne. *La Recherche*, 19, 88-92.
- Tiberghien, A. (1994) Modeling as a basis for analyzing teaching – learning situations. *Learning and Instruction*, 4, 71-87.

- Tiberghien, A., Psillos, D., & Koumaras, P. (1995). Physics instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional Science*, 22, 423-444.
- Tiberghien, A., Buty, C., Cordier, F., Cornuéjols, A., Veillard, L., Laborde, C., Bouchard, R., Coquidé, M., & Rogalski, J. (2002). *Des connaissances naïves au savoir scientifique*. Programme Ecole et Sciences cognitives. Disponible à l'adresse <http://edutice.archives-ouvertes.fr/docs/00/00/17/89/PDF/Tiberghien.pdf>
- Tiberghien, A., Buty, C., & Le Maréchal, J.-F. (2003). La modélisation, axe prioritaire d'une approche théorique sur les relations entre apprentissage et enseignement. In V. Albe, C. Orange & L. Simonneaux (Eds.), *Actes des 3èmes rencontres scientifiques de l'ARDIST « Recherches en didactique des sciences et des techniques : Questions en débat »* (p. 309-314). Toulouse : ENFA.
- Tiberghien, A., & Megalakaki O. (1995). Characterization of a modelling activity for a first qualitative approach to the concept of energy. *European Journal of Psychology of Education*, 10(4), 369-383.
- Tiberghien, A., Psillos, D., & Koumaras, P. (1995). Physics Instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional Science*, 22(6), 423-444.
- Tiberghien, A., Veillard, L., Le Maréchal, J. F., Buty, C., & Millar, R. (2001). An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several European countries. *Science Education*, 85(5), 483-508.
- Tiberghien, A., & Sensevy, G. (2012). Video studies: Time and duration in the teaching-learning processes In J. Dillon & D. Jorde (Eds.), *Handbook The World of Science Education*, Volume 4 (p. 141-179). Rotterdam/Boston/Taipei: Sense Publishers.
- Tiberghien, A., & Vince, J., (2002). Études de l'activité des élèves de lycée en situation d'apprentissage de la physique. In *Pluralité des langues et des supports : Descriptions et considérations pédagogiques*, ENS de Lyon. Disponible à l'adresse [http://www.inrp.fr/rencontres/seminaires/2004/sem\\_didac/andree\\_tiberghien\\_2.pdf](http://www.inrp.fr/rencontres/seminaires/2004/sem_didac/andree_tiberghien_2.pdf)
- Tiberghien, A., & Vince, J. (2005). Étude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du Français Contemporain*, 10, 153-176.
- Toussaint, J. (Ed.). (1996). *Didactique appliquée de la physique chimie*. Paris: Nathan.
- Van der Maren, J.-M. (2004). *Méthodes de recherche pour l'éducation*. Bruxelles : De Boeck & Larcier, 2<sup>ème</sup> édition (1<sup>ère</sup> édition 1996).
- Van Driel J., Verloop, N., & de Vos, W. (1998). Developing science teachers' pedagogical content knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 6(35), 673-695.
- Van Driel, J. & Verloop, N. (1999). Teachers' knowledge about models and modelling in science. *International Journal of Science Education*, 21(11), 1141-1153.
- Varennnes, F. (2008). Epistémologie des modèles et des simulations, tour d'horizon et tendances. Communication au colloque de la Société Française de Physique « *Les modèles : possibilités et limites* », Bibliothèque Nationale de France.

- Veillard, L., Tiberghien, A., & Vince, J. (2011). Analyse d'une activité de conception collaborative de ressources pour l'enseignement de la physique et la formation des professeurs : le rôle de théories ou outils spécifiques. *Activités*, 8(2), 202-227.
- Venturini, P. (2004). Note de synthèse: Attitudes des élèves envers les sciences: le point de recherches. *Revue Française de Pédagogie*, 149, 97-121.
- Venturini, P. (2007). The contribution of the theory of relation to knowledge to understanding students' engagement in learning physics. *International Journal of Science Education*, 29(9), 1065-1088.
- Venturini, P. (2012). Action, activité, "agir" conjoints en didactique: discussion théorique. *Education et Didactique*, 6(1), 127-136.
- Vergnaud, G. (1991). Langage et pensée dans l'apprentissage des mathématiques. *Revue française de pédagogie*, 96, 79-86.
- Verhaeghe, J.C., Wolfs, J. L., Simon X. & Compère, D. (2004). *Pratiquer l'épistémologie. Un manuel pour les maîtres et formateurs*. Bruxelles : De Boeck & Larcier.
- Vermersch P. (1994). L'entretien d'explicitation en formation initiale et en formation continue. Paris : ESF.
- Vezin, J.-F. (1972). L'apprentissage des schémas, leur rôle dans l'acquisition des connaissances. *L'année psychologique*, 72(1), 179-198.
- Vezin, J.-F. (1986). Schématisation et acquisition des connaissances. *Revue française de pédagogie*, 77, 71-78.
- Viennot, L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, 1, 13-27.
- Viennot, L. (1996) *Raisonnement en physique, La part de sens commun*. Bruxelles : De Boeck & Larcier.
- Viennot, L. (1998). Connaissances des élèves et apprentissage. In Tiberghien, A., Jossem, L., Barojas, J. (Eds.) *Résultats de Recherche en Didactique de la Physique au service de la Formation des Maîtres* (International Commission on Physics Education). Téléchargeable sur le site : <http://icar.univ-lyon2.fr/Equipe2/coast/ressources/ICPE/francais/TOC.asp>
- Vince, J., Coince, D., Coulaud, M., Déchelette, H., & Tiberghien, A. (2007). Un outil de diagnostic et d'évaluation pour aider l'élève en physique-chimie. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 101(893), 427-442.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.
- Walliser, B. (1977). Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes. Paris: Editions du Seuil.
- Wang, F., & Hannafin, M. J. (2005). Design-based research and technology-enhanced learning environments. *Educational Technology Research and Development*, 53(4), 5-23.
- Welzel M., Haller K., Bandiera M., Hammelev D., Koumaras P., Niedderer H., Paulsen A., Robinault K. und Von Aufschnaiter S. (1998) Ziele, die Lehrende mit dem Experimentieren in der

naturwissenschaftlichen Ausbildung verbinden - Ergebnisse einer europäischen Umfrage, *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 4(1), 29-44.

Yeo, J. & Gilbert, J. (2014). Constructing a Scientific Explanation - A Narrative Account. *International Journal of Science Education*, 36(11), 1902-1935.

Yvon, F. & Zinchenko, Y. (Eds) (2011). *Vygotsky une théorie du développement du développement et de l'éducation : Recueil de textes et commentaires*. Moscou : Faculté de psychologie de l'Université d'État de Moscou Lomonossov.

Zhang, J., & Norman, D. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18, 87-122.





# Index des auteurs

---

## A

Adam, 193, 221, 227  
Ainsworth, 84, 88, 92, 205, 206, 210, 227  
Airey, 200, 227, 235  
Aldon, 15, 156, 163, 227, 239  
Alibali, 104, 199, 200, 201, 204, 206, 208, 227, 236  
Allal, 41, 227  
Amade-Escot, 44, 52, 191, 210, 227  
*Amiel*, 31, 227  
Apotheloz, 173, 227  
Artigue, 27, 28, 228  
Arzarello, 103, 104, 169, 199, 200, 201, 202, 204, 228, 242  
Ashkenazi, 88, 198, 243  
Astolfi, 18, 228

## B

Bachelard, 50, 57, 65, 66, 70, 78, 228  
Badreddine, 130, 228  
Baldy, 156, 157, 228  
Barbier, 41, 228  
Barlet, 167, 207, 228  
Bautier, 193, 228  
Bécu-Robinault, 15, 21, 26, 28, 29, 39, 40, 45, 46, 58, 72, 75, 109, 121, 126, 138, 142, 144, 148, 149, 151, 153, 156, 161, 163, 169, 173, 175, 178, 183, 193, 204, 209, 214, 215, 216, 227, 228, 229, 230, 235, 239, 240, 243  
Bednarz, 19, 230  
Bell, 31, 243  
Bental, 120, 230  
Berg, 49, 230  
Berthiau, 112, 113, 114, 230  
Bertin, 97, 230  
Bertrand, 112, 113, 114, 230  
Berzin, 76, 77, 203, 230  
Bianchin, 97, 230  
Bisault, 76, 77, 203, 230  
Boilevin, 40, 52, 229, 230, 241  
Boivin-Delpieu, 15, 214, 216, 221, 230  
Bordon, 101, 230  
Bravo, 207, 231  
Brehelin, 73, 166, 231  
Bresson, 196, 231  
Bressoux, 41, 231  
Bronckart, 49, 126, 231  
Brousseau, 28, 52, 148, 164, 202, 207, 231  
Bru, 17, 231  
Bruner, 49, 231

Bucheton, 202, 231  
Bunge, 69, 70, 231  
Buty, 25, 28, 29, 38, 73, 151, 229, 231, 245

## C

Calmettes, 40, 163, 231  
Cantor, 79, 231  
Cardinet, 19, 231  
Carré, 49, 173, 235, 236  
Cauzinille-Marmèche, 108, 232  
Chaignerova, 48, 232  
Charlier, 30, 42, 232  
Chevallard, 12, 52, 232  
Chi, 107, 232  
Chomat, 72, 75, 232, 238, 240  
Chouinard, 173, 232  
Clark, 173, 232  
Clément, 192, 232  
Closset, 176, 232, 241  
Collet, 21, 24, 116, 119, 232, 235  
Conant, 44, 235  
Coquidé, 52, 73, 135, 191, 232, 239, 245  
Cornu, 52, 233  
Cosnier, 102, 233  
Coutaz, 217, 233  
Cross, 129, 130, 233

## D

D'Amore, 95, 233  
De Hosson, 40, 240  
De Landsheere, 19, 53, 233  
de Vries, 88, 91, 92, 97, 99, 100, 121, 151, 198, 233  
Delchambre, 53, 233  
Derycke, 83, 233  
Desgagné, 17, 18, 19, 233  
Design-Based Research Collective, 19, 31, 34, 233  
Dillenbourg, 48, 233  
DiSessa, 90, 107, 196, 234  
Doly, 173, 192, 198, 241  
Douady, 196, 234  
Drouin, 72, 74, 234  
Dubost, 28, 29, 234  
Dufays, 19, 35, 234  
Duhem, 65, 69, 234  
Duit, 46, 107, 152, 234  
Dupin, 10, 46, 50, 52, 108, 150, 191, 208, 234, 237, 244  
Duru-Bellat, 43, 234

Duval, 57, 81, 83, 85, 86, 87, 88, 91, 92, 96, 97, 98, 103,  
113, 153, 195, 208, 234  
Dykstra, 107, 234

## €

Engle, 44, 234, 235  
Englebert-Lecomte, 66, 67, 70, 235  
Everaert-Desmedt, 83, 235  
Evered, 29, 244

## F

Fabre, 51, 235  
Faux, 44, 235  
Félix, 52  
Feynman, 71, 235  
Filliettaz, 193, 194, 235  
Ford, 43, 235  
Forest, 53, 209, 210, 235  
Forman, 43, 235  
Forrest, 196, 235  
Fourez, 66, 67, 70, 235  
Fredlund, 199, 208, 235

## G

Gagliardi, 49, 235  
Gaidioz, 10, 21, 22, 24, 25, 26, 45, 56, 93, 191, 208, 229,  
235  
Garcia, 78, 242  
Gelas, 23, 25, 26, 39, 45, 229  
Gibson, 148, 192, 236  
Giere, 79, 236  
Gilbert, 77, 91, 173, 236, 238, 247  
Gobara, 45, 178, 229  
Goffard, 173, 236  
Goigoux, 193, 228  
Gold, 128, 236  
Goldin-Meadow, 200, 204, 206, 208, 227, 236  
Gooding, 78, 231, 236, 242  
Goodwin, 210, 236  
Goyette, 28, 29, 236  
Grandy, 79, 236  
Guedj, 73, 166, 231  
Gueudet, 216, 236  
Guillaud, 75, 76, 243

## H

Hackling, 200, 236  
Halbwachs, 66, 67, 69, 70, 71, 78, 237  
*Hannafin*, 31, 32, 246  
Hardy, 28, 237  
Harvey, 30, 34, 239  
Henri, 30, 232  
Henze, 89, 173, 237  
Hind, 108, 237, 243, 244

Hitt, 81, 88, 237  
Hodson, 89, 135, 237  
Hugon, 28, 237  
Hulin, 71, 237

## J

Johsua, 10, 46, 47, 50, 52, 108, 150, 191, 208, 234, 237  
Justi, 77, 78, 90, 172, 237, 238  
Juuti, 17, 31, 238

## K

Kendon, 104, 238  
Khanfour-Armalé, 121, 238  
Kohl, 199, 206, 238  
Koumaras, 108, 117, 151, 238, 245, 246  
Kozma, 167, 207, 210, 238  
Kress, 88, 103, 176, 201, 205, 238  
Kuhn, 71, 93, 238

## L

Labudde, 41, 238  
Larcher, 72, 75, 77, 183, 208, 232, 238  
Larouche, 17, 19, 233  
Latour, 81, 238  
Lavonen, 17, 31, 238  
Le Maréchal, 24, 38, 58, 73, 215, 229, 232, 233, 235,  
239, 240, 245  
Leach, 43, 55, 237, 238, 239, 243, 244  
Legendre, 41, 239  
Lemeignan, 72, 74, 239  
Lemke, 90, 239  
Lessard-Hébert, 28, 29  
Lessard-Hébert, 236  
Levy, 28, 29  
Lévy, 234  
Linder, 87, 199, 200, 205, 206, 227, 235, 239  
Liu, 28, 239  
Loarer, 43, 239  
Loiselle, 30, 34, 239  
Loisy, 39, 239  
Lund, 131, 132, 142, 144, 148, 149, 153, 169, 173, 175,  
178, 183, 204, 229, 230, 239, 244

## M

Magnusson, 216, 240  
Malafosse, 196, 240  
Margolinas, 47, 52, 173, 210, 240  
Martinand, 9, 46, 56, 76, 77, 203, 208, 240  
Martineau, 128, 240  
Mathé, 40, 240  
Maurines, 73  
Mc Neill, 102, 103, 200, 208, 240  
Medina, 148, 244  
Megalakaki, 116, 117, 119, 120, 128, 203, 245

Méheut, 40, 46, 72, 75, 166, 232, 238, 240  
 MEN, 21, 22, 39, 40, 41, 82, 112, 156, 178  
 Mercier, 23, 25, 39, 45, 74, 110, 191, 214, 229, 239, 240, 244  
 Mercier-Dequidt, 25, 39, 45, 110, 229, 239, 240  
 Meunier, 88, 103, 199, 242  
 Mingat, 43, 234  
 Minsky, 65, 241  
 Missonier, 176, 241  
 Morge, 40, 73, 110, 173, 192, 198, 229, 240, 241  
 Mortimer, 25, 43, 53, 54, 241, 244  
 Mosès, 84, 241  
 Mulhall, 108, 241

## N

Nathan, 104, 199, 200, 201, 227, 233, 238, 245  
 Ney, 62, 73, 241  
 Norman, 82, 148, 241, 247  
 Nunziati, 41, 241

## O

Orange, 51, 196, 235, 238, 242, 245  
 Orange-Ravachol, 196, 224, 242

## P

Paatz, 108, 242  
 Pansu, 41, 231  
 Paola, 104, 200, 202, 228  
 Paty, 79, 242  
 Peraya, 88, 103, 199, 242  
 Perrenoud, 41, 227, 242  
 Perrin-Glorian, 52, 232, 242  
 Pesa, 207, 231  
 Piaget, 78, 231, 242  
 Picavet, 79, 242  
 Pickering, 78, 242  
 Planinic, 195, 242  
 Plouin, 167, 207, 228  
 Posner, 8, 50, 242  
 Pozo, 51, 242  
 Psillos, 72, 117, 151, 228, 240, 245

## Q

Quilio, 220, 244

## R

Rabatel, 173, 202, 227, 239, 242  
 Radford, 176, 199, 204, 208, 242  
 Raisky, 52, 243  
 Rappoport, 88, 198, 243  
*Ratcliffe*, 31, 243, 244  
*Reeves*, 31, 227

Rivière, 193, 243  
 Robardet, 47, 51, 72, 75, 76, 191, 243  
 Rogalski, 184, 245  
 Rosengrant, 199, 206, 238, 243  
 Roth, 199, 200, 207, 236, 243  
 Roulet, 83, 243  
 Russel, 167, 207, 210

## S

Säljö, 50, 243  
 Sander, 108, 243  
 Sandoval, 31, 243  
 Santini, 73  
 Schneuwly, 48, 231, 243  
 Schön, 19, 243  
 Schramm, 221, 243  
 Schwarz, 91, 244  
 Scott, 43, 53, 54, 55, 108, 109, 237, 238, 239, 241, 242, 244  
 Seck, 130, 244  
 Sensevy, 73, 74, 129, 214, 220, 240, 244, 245  
 Sherin, 107, 234  
 Shipstone, 107, 244  
 Shulman, 216, 244  
 Siebel, 28, 237  
 Soulé, 202, 231  
 Spada, 50, 233, 244  
 Stieff, 92, 198, 244  
 Susman, 29, 244  
 Suthers, 132, 148, 170, 239, 244

## T

Tellier, 200, 244  
 Thuillier, 79, 244  
 Tiberghien, 7, 9, 10, 11, 21, 22, 24, 25, 38, 45, 46, 56, 58, 61, 76, 77, 93, 94, 95, 107, 116, 117, 119, 126, 128, 129, 150, 151, 161, 191, 203, 205, 208, 214, 225, 230, 233, 234, 235, 240, 244, 245, 246  
 Toussaint, 52, 238, 245  
 Trouche, 216, 236

## V

Van der Maren, 30, 245  
 Van Driel, 78, 89, 90, 172, 216, 237, 238, 245  
 Van Leeuwen, 88, 103, 176, 238  
 VanLabeke, 210, 227  
 Varennes, 64, 245  
 Veillard, 24, 233, 245, 246  
 Venturini, 43, 44, 52, 125, 191, 210, 225, 227, 235, 246  
 Vergnaud, 76, 81, 246  
 Vergnioux, 52, 233  
 Verhaeghe, 67, 246  
 Verloop, 78, 89, 172, 237, 245  
 Vermersch, 216, 246  
 Vezin, 99, 100, 142, 151, 246

Viennot, 50, 73, 93, 246

Vince, 10, 22, 38, 93, 126, 235, 245, 246

Von Rhöneck, 152, 234

Vosniadou, 50, 107, 242, 243, 246

## W

Wagner, 204, 206, 236

Walliser, 65, 66, 68, 69, 70, 71, 76, 79, 80, 109, 117, 118,  
166, 178, 198, 215, 246

*Wang*, 31, 32, 246

Weil-Barais, 72, 73, 74, 232, 235, 239

Welzel, 46, 246

Whalen, 196, 235

## Y

Yvon, 47, 232, 243, 247

## Z

Zhang, 82, 247

Zinchenko, 47, 232, 243, 247

# Sommaire

---

|                                                                                |               |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Chapitre 1: introduction</b>                                                | <b>7</b>      |
| <b>1 Remarques préliminaires</b>                                               | <b>7</b>      |
| 1.1 <i>Objet de cette note de synthèse</i>                                     | 7             |
| 1.2 <i>Didactique de la physique et interactions en classe</i>                 | 8             |
| 1.3 <i>Développement d'un cadre autour de la modélisation</i>                  | 9             |
| 1.4 <i>Caractérisation de l'étude ou de l'apprentissage ?</i>                  | 11            |
| <b>2 Organisation de la note de synthèse</b>                                   | <b>12</b>     |
| <br><b>Chapitre 2: un dispositif collaboratif</b>                              | <br><b>15</b> |
| <b>1 Introduction</b>                                                          | <b>15</b>     |
| <b>2 Les recherches collaboratives en éducation</b>                            | <b>17</b>     |
| 2.1 <i>Un enjeu pour la recherche en éducation</i>                             | 17            |
| 2.2 <i>Une posture « impliquée » du chercheur en éducation à justifier</i>     | 18            |
| <b>3 Description et caractérisation de mes recherches</b>                      | <b>19</b>     |
| 3.1 <i>Enjeu de la recherche en didactique</i>                                 | 20            |
| 3.2 <i>Objectifs des acteurs</i>                                               | 22            |
| 3.3 <i>Organisation du processus de recherche</i>                              | 24            |
| 3.4 <i>Rôle des enseignants et des chercheurs</i>                              | 25            |
| 3.5 <i>Représentation synthétique des projets collaboratifs</i>                | 26            |
| <b>4 Description de recherches collaboratives usuelles en éducation</b>        | <b>27</b>     |
| 4.1 <i>L'ingénierie didactique</i>                                             | 27            |
| 4.2 <i>La recherche-action</i>                                                 | 28            |
| 4.3 <i>La recherche développement</i>                                          | 30            |
| 4.4 <i>La Design-Based Research</i>                                            | 31            |
| <b>5 Synthèse : comment qualifier mes recherches ?</b>                         | <b>33</b>     |
| <br><b>Chapitre 3: Conception de séances: contextes et ancrages théoriques</b> | <br><b>37</b> |
| <b>1 Introduction</b>                                                          | <b>37</b>     |
| <b>2 Les injonctions institutionnelles</b>                                     | <b>37</b>     |
| 2.1 <i>Une toile de fond pour l'enseignement des sciences</i>                  | 37            |
| 2.2 <i>Le savoir à enseigner</i>                                               | 38            |
| <b>3 Les contraintes de terrain</b>                                            | <b>42</b>     |



|                                                                          |                                                                                                         |            |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1                                                                      | <i>Des contraintes locales aux contraintes partagées</i>                                                | 42         |
| 3.2                                                                      | <i>De la gestion de l'hétérogénéité aux types d'activités proposées</i>                                 | 42         |
| 3.3                                                                      | <i>De la motivation à l'engagement disciplinaire productif</i>                                          | 43         |
| 3.4                                                                      | <i>Le matériel à disposition et la structuration des séquences</i>                                      | 45         |
| <b>4</b>                                                                 | <b>Les résultats de recherche en didactique</b>                                                         | <b>46</b>  |
| 4.1                                                                      | <i>Les types de recherches mobilisées</i>                                                               | 46         |
| 4.2                                                                      | <i>L'élève</i>                                                                                          | 47         |
| 4.3                                                                      | <i>La classe</i>                                                                                        | 51         |
| 4.4                                                                      | <i>La physique</i>                                                                                      | 56         |
| <b>5</b>                                                                 | <b>Synthèse : les cadres didactiques pour la conception</b>                                             | <b>58</b>  |
| <b>Chapitre 4: le cadre épistémo-sémiotique</b>                          |                                                                                                         | <b>61</b>  |
| <b>1</b>                                                                 | <b>Introduction</b>                                                                                     | <b>61</b>  |
| <b>2</b>                                                                 | <b>La modélisation</b>                                                                                  | <b>62</b>  |
| 2.1                                                                      | <i>Les modèles et la modélisation dans les programmes</i>                                               | 62         |
| 2.2                                                                      | <i>Modèles et modélisation : le sens commun</i>                                                         | 64         |
| 2.3                                                                      | <i>Modèles et modélisation dans l'épistémologie de la physique</i>                                      | 64         |
| 2.4                                                                      | <i>Les modèles et la modélisation dans la recherche en didactique</i>                                   | 71         |
| <b>3</b>                                                                 | <b>Les représentations sémiotiques</b>                                                                  | <b>80</b>  |
| 3.1                                                                      | <i>Les représentations dans les programmes officiels de sciences physiques</i>                          | 81         |
| 3.2                                                                      | <i>Définition des représentations sémiotiques</i>                                                       | 82         |
| <b>4</b>                                                                 | <b>Synthèse : modèles, modélisation et registres sémiotiques</b>                                        | <b>89</b>  |
| 4.1                                                                      | <i>L'apport des modèles et de la modélisation</i>                                                       | 89         |
| 4.2                                                                      | <i>L'apport des registres sémiotiques</i>                                                               | 90         |
| <b>5</b>                                                                 | <b>La modélisation et les registres sémiotiques dans le cadre épistémo-sémiotique (CES)</b>             | <b>93</b>  |
| 5.1                                                                      | <i>Les niveaux de modélisation pour décrire les productions</i>                                         | 93         |
| 5.2                                                                      | <i>Les registres sémiotiques pour décrire les productions orales et écrites</i>                         | 95         |
| 5.3                                                                      | <i>Les interactions multimodales</i>                                                                    | 102        |
| <b>Chapitre 5: Le CES dans la conception de séquences d'enseignement</b> |                                                                                                         | <b>107</b> |
| <b>1</b>                                                                 | <b>Mobilisation du CES pour la conception de séquences dans le cadre des projets « collège »</b>        | <b>107</b> |
| 1.1                                                                      | <i>Les modèles et la modélisation en électricité</i>                                                    | 107        |
| 1.2                                                                      | <i>Les registres sémiotiques en jeu dans les activités proposées aux élèves</i>                         | 110        |
| 1.3                                                                      | <i>Mise en parallèle de modèles complémentaires et des représentations sémiotiques associées</i>        | 115        |
| <b>2</b>                                                                 | <b>Mobilisation du CES pour la conception de séquences dans le cadre du projet « énergie » au lycée</b> | <b>118</b> |
| 2.1                                                                      | <i>Introduction du modèle énergétique dans les séquences d'enseignement</i>                             | 118        |
| 2.2                                                                      | <i>Des modèles complémentaires et des représentations sémiotiques à distinguer</i>                      | 118        |
| 2.3                                                                      | <i>Articulation de niveaux de modélisation et abstractions intermédiaires</i>                           | 120        |
| 2.4                                                                      | <i>Influence des éléments représentés dans le registre schéma sur les activités de modélisation</i>     | 121        |

|                                                                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Chapitre 6: Les analyses produites avec le cadre épistemo-sémiotique</b>                                               | <b>123</b> |
| <b>1 Introduction</b>                                                                                                     | <b>123</b> |
| <b>2 Méthodologie</b>                                                                                                     | <b>124</b> |
| 2.1 Constitution du corpus de données                                                                                     | 124        |
| 2.2 Grille d'analyse : les niveaux de modélisation et registres sémiotiques mobilisés dans les analyses                   | 126        |
| 2.3 Les outils d'aide à l'analyse                                                                                         | 128        |
| <b>3 Résultats sur les pratiques d'étude</b>                                                                              | <b>134</b> |
| 3.1 Le rôle de la manipulation des objets sur les activités de modélisation                                               | 134        |
| 3.2 Les instructions données aux élèves et les activités de modélisation                                                  | 144        |
| 3.3 Influence des registres sémiotiques sur les activités de modélisation                                                 | 153        |
| 3.4 Influence des connaissances liées aux mathématiques sur les activités de modélisation et de représentation sémiotique | 155        |
| 3.5 Trajectoire d'étude individuelle et trajectoire d'étude du groupe d'élèves                                            | 169        |
| <b>4 Résultats sur les pratiques d'étude et d'enseignement</b>                                                            | <b>172</b> |
| 4.1 Une dissymétrie des interlocuteurs en termes de niveau de modélisation et de faisceau sémiotique                      | 173        |
| 4.2 Ajustements du discours, paroles et gestes pour l'aide à la compréhension de la consigne écrite                       | 175        |
| 4.3 Gestion des modèles et registres sémiotiques issus d'autres disciplines                                               | 178        |
| 4.4 Le geste pour préparer l'introduction de nouveaux éléments au modèle physique                                         | 183        |
| <b>Chapitre 7: Synthèse et discussion sur le cadre épistémio-sémiotique</b>                                               | <b>189</b> |
| <b>1 Bilan thématique des résultats</b>                                                                                   | <b>189</b> |
| 1.1 Les activités de modélisation et de représentation des élèves et les caractéristiques du milieu matériel              | 190        |
| 1.2 Les activités de modélisation et de représentation des élèves et les caractéristiques des consignes de l'enseignant   | 192        |
| 1.3 L'articulation entre registres sémiotiques et activités de modélisation                                               | 194        |
| 1.4 Les conversions entre représentations sémiotiques statiques et dynamiques                                             | 199        |
| 1.5 L'évolution des modèles élaborés par les élèves                                                                       | 202        |
| <b>2 Evolutions et apports spécifiques du cadre épistémio-sémiotique</b>                                                  | <b>204</b> |
| 2.1 Des hypothèses de conception et d'analyse à discuter                                                                  | 204        |
| 2.2 Les apports spécifiques du CES                                                                                        | 207        |
| 2.3 Les limites du cadre épistémio-sémiotique                                                                             | 209        |
| <b>Chapitre 8: perspectives de recherche ouvertes par le CES</b>                                                          | <b>213</b> |
| <b>1 Répercussions sur les recherches en cours</b>                                                                        | <b>213</b> |
| 1.1 Evolution des niveaux de modélisations                                                                                | 213        |
| 1.2 Analyse des ressources et documents des professeurs                                                                   | 216        |
| <b>2 Perspectives de recherches</b>                                                                                       | <b>217</b> |
| 2.1 Modélisation, représentations, objets tangibles et surfaces tactiles                                                  | 217        |
| 2.2 Les incitations à l'action                                                                                            | 220        |
| <b>3 Synthèse des perspectives ouvertes par les CES</b>                                                                   | <b>222</b> |

|                                                                          |                |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>4 Implications sur les méthodologies</b>                              | <b>224</b>     |
| 4.1 <i>Les recherches collaboratives</i>                                 | 224            |
| 4.2 <i>Etudier la complexité des pratiques d'étude et d'enseignement</i> | 225            |
| <br><b>Bibliographie</b>                                                 | <br><b>227</b> |
| <br><b>Index des auteurs</b>                                             | <br><b>249</b> |
| <br><b>Sommaire</b>                                                      | <br><b>253</b> |

---